

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Faculté des sciences appliquées

Département de génie civil

**INFLUENCE DE LA FORME ET DE LA RUGOSITÉ DES PARTICULES D'UN
GRANULAT SUR LES PROPRIÉTÉS ET LES COÛTS DU BÉTON COMPACTÉ
AU ROULEAU**

Mémoire de maîtrise és sciences appliquées
Spécialité: génie civil

Noureddine JEMMALI

Sherbrooke (Québec), CANADA

Mai 1996

SOMMAIRE

Notre étude a consisté à mettre en évidence le rôle de la forme et de la rugosité du granulat sur les propriétés du BCR pour barrages. Quatre types de gros granulats et quatre types de sables provenant de différentes installations industrielles, ayant des caractéristiques physiques et géométriques différentes, ont été sélectionnés. Tous les BCR confectionnés ont été fabriqués avec les mêmes matériaux cimentaires et ont généralement une formulation voisine de celle utilisée pour la construction du barrage du Lac Robertson.

Les résultats expérimentaux sur les mélanges granulaires montrent que la mesure du volume des vides du granulat compacté (V_{vc}) permet de tenir compte de la forme et de la rugosité des particules lors de l'étape de formulation d'un BCR. De même, les résultats obtenus sur le BCR frais et durci ont montré que la forme et la rugosité des particules d'un granulat ont une grande influence sur la maniabilité et sur certaines caractéristiques physiques du BCR. Une relation permettant de prédire la maniabilité (temps Vebe VC) du BCR à partir du taux de remplissage des vides du mélange granulaire (le rapport entre le volume de pâte dans le BCR et le volume des vides du mélange granulaire compacté: VP/V_{vc}) a été proposée.

Nous avons aussi pu estimer l'augmentation du coût de production pour 1 m³ de BCR, résultant de l'utilisation d'un plus grand volume de pâte, afin de compenser la perte de maniabilité occasionnée par l'utilisation d'un granulat dont les particules ont une forme et une rugosité qui ne sont pas optimales. Enfin, nous avons présenté une analyse économique simplifiée permettant de guider le choix, en fonction de l'éloignement et de l'importance du chantier, entre l'investissement dans un système de concassage sophistiqué (afin d'améliorer la forme des particules du granulat) et l'utilisation d'un plus grand volume de matières cimentaires.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma gratitude à mon directeur de maîtrise, Monsieur Richard GAGNÉ, qui m'a proposé ce sujet. Son dévouement, ses conseils judicieux et ses nombreux encouragements furent pour moi un soutien très précieux.

Mes remerciements s'adressent aussi à Monsieur Gérard BALLIVY, co-directeur de cette thèse, pour sa collaboration et son soutien.

Que Monsieur Pierre-Claude AÏTCIN, qui a accepté d'assurer la supervision de ce mémoire, trouve ici tous mes remerciements pour l'aide et le temps qu'il m'a consacré. Il m'a fait bénéficier de sa vaste expérience.

Qu'il me soit permis de remercier Monsieur Arezki TAGNIT-HAMOU qui m'a fait l'honneur d'agir à titre d'examineur.

Je suis très reconnaissant à Hydro-Québec et particulièrement Monsieur François ROBITAILLE pour avoir supporté et financé ce projet de recherche.

Que tous ceux qui, de près ou de loin, ont participé à la réalisation de cette étude, voient ici l'expression de ma gratitude.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
1. INTRODUCTION	1
2. GRANULATS POUR LE BÉTON	3
2.1 Introduction	3
2.2 Rappels de minéralogie et de pétrographie	3
2.2.1 Roches magmatiques	4
2.2.2 Roches métamorphiques	5
2.2.3 Roches sédimentaires	5
2.3 Les principes de fabrication des granulats	6
2.3.1 Les granulats de carrière	7
2.3.1.1 Le concassage	7
2.3.1.1.1 a. Concasseurs travaillant par écrasement	8
2.3.1.1.2 b. Concasseurs travaillant par chocs	11
2.3.1.1.3 c. Choix du type de concasseur	12
2.3.1.2 Le criblage	13
2.3.2 Les granulats alluvionnaires	14
2.4 Les caractéristiques géométriques des granulats affectant leur qualité	14
2.4.1 La granulométrie: théorie de la granulation optimale selon Caquot	14
2.4.2 Forme des particules	18
2.4.2.1 Indice d'aplatissement, I_F	20
2.4.2.2 Indice d'allongement, I_E	20
2.4.2.3 Discussion	21
2.4.2.4 Amélioration de la forme des particules	24
3. LE CONCEPT DU BÉTON COMPACTÉ AU ROULEAU	25
3.1 Introduction	25
3.2 Le BCR selon deux approches	25
3.2.1 L'approche sol	25
3.2.2 L'approche béton	26
3.3 Les constituants d'un BCR	27
3.3.1 Matériaux cimentaires	27
3.3.2 Granulats	28
3.3.3 Eau	28
3.3.4 Adjuvants	28
3.4 Dosage des BCR	29
3.4.1 Formulation selon les concepts de compactage des sols (approche sol) ..	29
3.4.2 Formulation des mélanges riches en liants (approche béton)	30
3.5 Propriétés mécaniques et physiques du BCR	34
3.5.1 Les propriétés mécaniques	35
3.5.1.1 Résistance à la compression	35
3.5.1.2 Résistance à la traction	36
3.5.1.3 Résistance au cisaillement	37
3.5.2 Perméabilité	37
3.5.3 Durabilité	38
3.5.3.1 Résistance au gel-dégel	38
3.5.3.2 Résistance à l'érosion	38
3.5.3.3 Changement volumétrique	38

4.	BUT DE LA RECHERCHE ET PROGRAMME EXPÉRIMENTAL	40
4.1	But de la recherche	40
4.2	Programme expérimental	41
4.2.1	Essais sur mélanges granulaires	41
4.2.2	Essais sur le BCR	41
5.	MATÉRIAUX ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES	43
5.1	Matériaux utilisés	43
5.1.1	Ciment	43
5.1.2	Cendres volantes	43
5.1.3	Eau de gâchage	44
5.1.4	Agent réducteur d'eau	44
5.1.5	Granulats fins	44
5.1.6	Gros granulats	46
5.1.7	Mélanges granulaires complets	49
5.2	Procédures expérimentales	50
5.2.1	Détermination du pourcentage de particules plates et allongées des granulats selon NQ 2560-265/1986-07-07	50
5.2.2	Détermination des masses volumiques minimale et maximale des granulats selon NQ 2560-060/83	50
5.2.3	Détermination de la masse volumique pilonnée des granulats selon NQ 2560-060/083	50
5.2.4	Détermination de la maniabilité et de la masse volumique du BCR selon ASTM C1170-91	51
5.2.5	Détermination de la perméabilité à l'eau du BCR à 91d	52
5.2.6	Détermination de la résistance à la compression simple du BCR	53
5.2.7	Détermination du module d'élasticité statique (E _c) du BCR	53
5.2.8	Coiffage des éprouvettes	53
5.2.9	Procédure de malaxage pour la confection du BCR	53
5.2.10	Fabrication des éprouvettes d'essai selon ASTM C1176-91	54
6.	PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS	56
6.1	Caractéristiques des mélanges granulaires	56
6.1.1	Tranches granulométriques	56
6.1.2	Mélanges granulaires complets (0-28 mm)	62
6.2	CARACTÉRISTIQUES DES BCR CONFECTIONNÉS	65
6.2.1	Influence de la forme et de la rugosité des particules sur la maniabilité	65
6.2.2	Résistance à la compression	69
6.2.3	Perméabilité à l'eau	70
6.2.4	Module d'élasticité statique	71
6.3	Analyse économique	73
7.	CONCLUSION	76
	BIBLIOGRAPHIE	78

LISTE DES FIGURES

Figures		pages
2.1	Concasseurs giratoires: À cône normal et à cône court.....	9
2.2	Concasseur à mâchoires à simple effet.....	10
2.3	Concasseur à chocs primaire.....	11
2.4	Concasseur à projection dit finisseur (ou correcteur de forme).....	12
2.5	Les remplissages théorique et pratique d'un récipient par le mélange de deux granulats.....	16
2.6	Réduction du volume des vides par combinaison de différentes tranches granulométriques.....	18
2.7	Dimensions d'une particule d'un granulat.....	19
2.8	Les six catégories de la forme d'une particule.....	19
2.9	Jauge standard d'aplatissement.....	20
2.10	Jauge standard d'allongement.....	21
2.11	Catégories de la forme d'une particule définies par des limites arbitraires.....	22
2.12	Principe de la mesure du coefficient d'aplatissement.....	23
3.1	Comparaison entre la densité sèche et la résistance à la compression des BCR.....	26
3.2	Relation générale entre la résistance à la compression et le rapport eau/liant ...	27
3.3	Relations densité vs teneur en eau pour des BCR consolidés à différentes énergies de compaction.....	29
3.4	Courbe résistance à la compression du BCR vs le rapport E/C.....	31
3.5	Courbe résistance à la compression du BCR vs la quantité de ciment.....	32
3.6	Comparaison entre la résistance à la compression à 7 jours d'un BCR compacté et d'un autre vibré.....	35
3.7	Relation entre la résistance à la compression vs la teneur en liant en fonction de l'âge du BCR.....	36
3.8	Relation entre la teneur en eau et la résistance à la compression des BCR.....	36
3.9	Relation entre la perméabilité du BCR et sa teneur en liant.....	37

4.1	Organigramme du projet de recherche	42
5.1	Courbes granulométriques des 4 types de sables utilisés dans cette étude.....	45
5.2	Forme et rugosité typiques des particules du gros granulat P.....	47
5.3	Forme et rugosité typiques des particules du gros granulat du projet du Lac Robertson LR.....	47
5.4	Forme et rugosité typiques des particules du gros granulat LGC.....	48
5.5	Forme et rugosité typiques des particules du gros granulat naturel (roulé) LGR.....	48
5.6	Variation de la granulométrie du mélange granulaire complet en fonction des 4 types de sables utilisés dans cette étude.....	49
5.7	Le principe de fonctionnement d'un appareil Vebe modifié.....	51
5.8	Principe de mesure de la perméabilité à l'eau	52
5.9	Procédure de malaxage utilisée pour la confection des BCR.....	54
6.1	Influence de la teneur en particules plates sur l'indice des vides Ivp de chacune des tranches granulométriques	59
6.2	Influence de la teneur en particules allongées sur l'indice des vides Ivp de chacune des tranches granulométriques	60
6.3	Influence de la teneur en particules plates et allongées sur l'indice des vides Ivp de chacune des tranches granulométriques	60
6.4	Influence de la teneur en particules plates sur l'indice des vides Ivc de chacune des tranches granulométriques	61
6.5	Influence de la teneur en particules allongées sur l'indice des vides Ivc de chacune des tranches granulométriques	61
6.6	Influence de la teneur en particules plates et allongées sur l'indice des vides Ivc de chacune des tranches granulométriques.....	62
6.7	Relation entre le taux de remplissage des vides de compactage (VP/Vvc) et la maniabilité du BCR (temps Vebe)	66
6.8	Influence de la forme et de la rugosité des granulats sur la maniabilité des BCR.....	67
6.9	Influence du volume de pâte sur la maniabilité du BCR.....	68
6.10	Effet de la rugosité du granulat sur l'épaisseur du film d'eau adsorbée.....	71
6.11	Influence de la forme et de la rugosité des granulats sur la perméabilité et le module élastique du BCR.....	72

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux		pages
2.1	Classification chimique des roches magmatiques.....	4
2.2	Anisotropie des roches schisteuses.....	5
3.1	Teneurs en eau et en air approximatives pour différentes DMG (BCR sans air entraîné).....	31
3.2	Granulométrie idéale du gros granulat	33
3.3	Fuseau granulométrique recommandé pour les granulats fins	33
3.4	Rapport du volume des granulats fins sur le volume total occupé par les granulats.....	33
3.5	Quantité de mortier approximative.....	34
3.6	Valeurs typiques des propriétés thermiques des BCR	39
5.1	Composition de Bogue du ciment utilisé	43
5.2	Caractéristiques physico-chimiques du ciment types 20M et des cendres volantes.....	44
5.3	Nature et origine des différents granulats fins utilisés	45
5.4	Caractéristiques physiques des sables	46
5.5	Caractéristiques physiques des gros granulats.....	49
5.6	Programme d'essais sur les échantillons de béton durci.....	55
6.1	Teneur en particules plates et/ou allongées, masses volumiques et indices des vides Ivp et Ivc des gros granulats (fraction 5-10 mm)	56
6.2	Teneur en particules plates et/ou allongées, masses volumiques et indices des vides Ivp et Ivc des gros granulats (fraction 10-14 mm).....	57
6.3	Teneur en particules plates et/ou allongées, masses volumiques et indices des vides Ivp et Ivc des gros granulats (fraction 14-20 mm).....	57
6.4	Teneur en particules plates et/ou allongées, masses volumiques et indices des vides Ivp et Ivc des gros granulats (fraction 20-28 mm).....	58
6.5	Masses volumiques et indices des vides Ivp et Ivc des sables	58
6.6	Caractéristiques des particules des mélanges granulaires.....	63

6.7	Masses volumiques, indice des vides I _{vc} et volume des vides de compactage des mélanges granulaires.....	64
6.8	Caractéristiques des mélanges et propriétés des BCR.....	65
6.9	Caractéristiques du BCR durci.....	69
6.10	Augmentation du coût de production d'un mètre cube de BCR en fonction du volume de pâte ajouté et du prix des matériaux cimentaires.....	71

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Le béton compacté au rouleau (BCR) est un matériau de construction relativement nouveau qui offre plusieurs avantages techniques et économiques, notamment pour construire des barrages. On estime que le coût approximatif du BCR est 25 à 50% plus faible que celui du béton de masse conventionnel [4]. Cette différence dans les coûts se justifie par:

- le faible volume des matériaux cimentaires, ce qui permet de diminuer les coûts associés au transport du ciment sur le site et limite les problèmes de fissuration thermique pendant la construction (les tuyaux de refroidissement ne sont pas nécessaires);
- la méthode de mise en place (en couches horizontales), ayant comme conséquence la réduction de la surface de coffrage (puisque les joints transversaux ne sont pas coffrés);
- les moyens de transport (convoyeur et camions à bennes basculantes) et de mise en place (bulldozers et rouleaux vibrateurs) qui permettent un rythme de construction rapide.

Pour pouvoir profiter pleinement des avantages offerts par ce matériau, il est absolument nécessaire d'effectuer un contrôle serré de la qualité des matériaux et, en particulier, des granulats qui représentent environ 85% en volume.

Il est bien connu qu'un granulat comportant une forte proportion de particules plates et allongées se compacte difficilement et possède un indice des vides intergranulaires plus élevé qu'un granulat similaire constitué de particules plus arrondies. L'indice des vides du mélange granulaire est un paramètre important de formulation d'un BCR car il influence plusieurs de ses propriétés dont notamment sa compacité, sa maniabilité et ses propriétés mécaniques. Il faut donc porter une attention particulière aux caractéristiques du mélange granulaire, car un mélange ayant un indice des vides élevé donnera un BCR moins économique, moins maniable ou nécessitant une plus grande quantité de matières cimentaires pour satisfaire les exigences de performance (maniabilité, propriétés mécaniques, perméabilité, durabilité). Le coût des matières cimentaires peut-être très élevé lorsque l'on construit un barrage dans un endroit pas toujours très

facile d'accès. Il peut être avantageux, économiquement parlant, d'investir un peu plus dans la fabrication des granulats qui sont déjà sur place et que l'on utilise en grande quantité plutôt que d'essayer de compenser une faiblesse marquée des granulats (par manque d'attention) en augmentant la teneur en matières cimentaires qui viennent de très loin (très dispendieuses) et qui peuvent causer des problèmes au niveau du dégagement de chaleur et du retrait.

En général, la forme des particules d'un granulat dépend du mode de concassage (circuit ouvert ou fermé), du type de concasseur et de la nature minéralogique de la roche mère. Les sous-traitants en concassage n'effectuent généralement pas un contrôle très rigoureux de la forme des granulats qu'ils produisent puisqu'ils n'ont jamais été incités à produire des granulats cubiques, ou pénalisés parce qu'ils produisaient des particules plates et allongées. Les systèmes de concassage composés d'un concasseur à mâchoires, comme système primaire, et de concasseurs coniques, comme système secondaire et tertiaire, sont d'une grande popularité car ils permettent d'avoir un bon débit horaire avec un minimum de maintenance. Par contre, très souvent de tels systèmes produisent beaucoup de particules plates et allongées lorsqu'ils sont mal utilisés.

CHAPITRE 2

GRANULATS POUR LE BÉTON

2.1 INTRODUCTION

Dans un contexte général, on désigne par le terme «béton» un mélange d'eau, de ciment ou liant, et de granulats. L'eau et le ciment forment la pâte et les granulats forment le matériau de remplissage inerte. Le terme «inerte» signifie que les granulats ne réagissent pas avec le liant et ne participent à la résistance du béton que par la compacité qu'ils confèrent à celui-ci. Cette idée de la participation des granulats, uniquement comme produit de remplissage, ne peut plus maintenant être admise telle quelle car il est prouvé que: «tous les granulats sont réactifs. Ils diffèrent seulement par la nature des réactions auxquelles ils participent, par l'intensité et la vitesse de ces réactions et leurs effets» [23].

En terme de volume absolu, les granulats représentent 60 à 85% du volume du béton et sont, par conséquent, le constituant principal. Le type de granulats et le volume qu'ils occupent influencent considérablement les propriétés mécaniques du béton, son dosage et son coût.

Le choix des granulats destinés au béton est plus délicat qu'on pourrait le penser, d'autant plus que ces granulats doivent être aussi bon marché que possible, c'est-à-dire produits à la distance minimale du lieu d'utilisation.

Pour qu'un granulat puisse être un bon constituant du béton, il faut donc:

- qu'il soit convenable du point de vue pétrographique;
- qu'il joue bien son rôle de «produit de remplissage»: pour cela, ses caractéristiques géométriques définies au paragraphe 2.4 doivent être appropriées à la destination du béton, ce qui implique des spécifications bien adaptées; il serait peu économique d'exiger systématiquement «le meilleur banc de la meilleure carrière»;
- enfin, une variabilité des caractéristiques constatées compatibles avec les spécifications, ce qui implique des équipements de production relativement perfectionnés.

2.2 RAPPELS DE MINÉRALOGIE ET DE PÉTROGRAPHIE

Les roches sont formées par des assemblages de minéraux, l'étude des minéraux eux-mêmes est l'objet de la minéralogie, la manière dont les assemblages sont faits, et la composition

minéralogique qui en résulte sont l'objet de la pétrographie. On distingue trois ensembles de roches, les roches magmatiques, les roches sédimentaires et les roches métamorphiques.

2.2.1 Roches magmatiques

Les roches magmatiques, caractérisées par une structure massive, se forment à partir du refroidissement d'un magma. Si le magma s'est refroidi lentement, les minéraux se sont largement développés et l'on a une roche à texture grenue avec des minéraux de dimension millimétrique bien visibles à l'œil nu: roche intrusives. Si le magma s'est refroidi rapidement en s'épanchant à la surface de l'écorce terrestre, la plupart des cristaux n'ont pas eu le temps de se développer et ils ne sont pas visibles à l'œil nu: roches extrusives où subsiste une phase vitreuse très finement cristallisée. On peut donc avoir pour une composition chimique identique (même magma originel), des textures très différentes. Une texture très fine conduit toujours à une forte résistance mécanique, mais les cassures sont plus lisses et ces roches sont plus polissables [24].

D'un point de vue chimique, les roches magmatiques sont des combinaisons de huit éléments chimiques seulement. Parmi ceux-ci, l'oxygène est dominant, et viennent ensuite la silice, l'aluminium, le fer, le calcium, le sodium, le potassium et le magnésium. En terme d'oxydes, la silice (SiO_2) est de loin le plus abondant. La classification des roches magmatiques selon leurs teneurs en silice permet donc de définir quatre catégories de roches à savoir:

Tableau 2.1: Classification chimique des roches magmatiques [24].

Roche magmatique	% en poids de SiO_2
acide	> 66
intermédiaire	50-66
basique	45-50
ultrabasique	< 45

Lors de la sélection des granulats, il est nécessaire de connaître la texture et la classe chimique de la roche. Un granulat à texture vitreuse, issu d'une roche magmatique acide, peut favoriser le développement des réactions alcalis-silice. De même, la surface de contact entre les minéraux dans une roche constitue une surface de faiblesse où peut se développer une microfissure intergranulaire. Habituellement, cette microfissuration influence considérablement le comportement mécanique de cette roche.

2.2.2 Roches métamorphiques

La transformation des roches éruptives ou sédimentaires, sous l'action de la température et de la pression au fur et à mesure de leur enfoncement en profondeur, conduit aux roches métamorphiques.

D'autres facteurs interviennent dans le métamorphisme, en particulier les échanges ioniques. La multiplicité des matériaux originels et des actions (température, pression, ..etc.) rend toute classification difficile. Les roches métamorphiques ont généralement en commun une structure foliée plus ou moins marquée. Certaines roches à grains très fins (0,005 mm) peuvent avoir des résistances remarquables: 180 à 250 MPa en compression simple, c'est le cas des ardoises en particulier. Cependant, une forte anisotropie des propriétés mécaniques rend ces roches peu utilisables dans le domaine du béton. Cette anisotropie est le résultat des fortes pressions qui provoquent la concentration et l'alignement des minéraux, eux-mêmes anisotropes, suivant une direction préférentielle perpendiculaire à la direction de la pression. La présence en quantité considérable de tels minéraux est indésirable car elle peut affecter sérieusement le comportement mécanique des granulats.

Tableau 2.2: Anisotropie de roches schisteuses [3].

Caractéristiques de la roche	Orientation	
	Dans le plan de schistosité	Perpendiculairement au plan de schistosité
Résistance à la compression (MPa)	49	100
Vitesse des ondes (m/s)	3100	5800

2.2.3 Roches sédimentaires

Les roches sédimentaires résultent d'un dépôt, qu'il soit actuel ou ancien, à la suite de processus d'érosion et de sédimentation. Ces processus, très brièvement schématisés, sont les suivants:

- Une décomposition ou altération des différentes roches selon leur nature et le climat;
- Les résidus de cette altération sont entraînés par des agents de transport (eaux de ruissellement, les glaciers, le vent, etc);
- l'accumulation ou le dépôt des débris en strates dans des bassins sédimentaires.

Selon leur composition, ces roches sont divisées en deux catégories: les roches sédimentaires d'origine détritique (grès, sables, etc.) et les roches sédimentaires d'origine chimique (calcaire, dolomies). Notons que ces roches sont la plupart du temps formées des deux fractions (soit la fraction détritique et chimique) et sont classées selon la fraction dominante.

Les conditions dans lesquelles se forment de telles roches peuvent être très variées et cela a une répercussion sur leurs caractéristiques. Une roche consolidée à faible profondeur peut être beaucoup plus poreuse et par le fait même moins résistante. Suite à leur mode de formation, ces roches sont formées de couches stratifiées et sont donc anisotropes. Leur comportement mécanique diffère donc selon la direction considérée. De plus, elles contiennent beaucoup d'impuretés, notamment des minéraux argileux que l'on considère nuisibles dans les granulats. La connaissance de ces quelques particularités permet de comprendre la variété des performances de certains granulats provenant de roches sédimentaires.

De même que la composition minéralogique, la structure des roches est un élément important dans leur classification, puisqu'elle est une indication de la manière dont les assemblages de minéraux sont réalisés dans la roche. On peut distinguer cinq structures de base:

- macrogrenue (10 mm)
- grenue (1 mm)
- microgrenue (0.1 mm)
- cryptocristalline (< 0.01 mm)
- vitreuse (---)

Pour préciser certaines particularités de la structure; on dira qu'une structure est:

- porphyrique lorsqu'elle est composée de cristaux millimétriques enrobés dans une matrice plus fine;
- orientée lorsqu'elle est anisotrope à cause de l'orientation préférentielle des cristaux;
- schisteuse si elle est très orientée;
- litée si elle présente des alternances de couches;
- fissurée si un réseau de fissures parcourt la roche [6].

2.3 LES PRINCIPES DE FABRICATION DES GRANULATS

Il n'est pas toujours possible de trouver dans la nature des gisements de granulats qui ont exactement les caractéristiques techniques désirées leur permettant de remplir sans traitement les

fonctions auxquelles on les destine. Il faut impérativement les transformer dans des installations de production, ou bien les fabriquer en concassant et en tamisant des morceaux de roches abattus par dynamitage sur le front de taille d'une carrière.

Les granulats sont donc produits suite aux quatre opérations suivantes:

- l'extraction de la matière première;
- le concassage;
- le criblage;
- le stockage avant expédition.

Parfois, une seule opération complète ou remplace un de ces quatre traitements. Par exemple, la cuisson des nodules d'argile ou de schiste prend place entre le concassage et le criblage et lorsque les nodules sont moulés, le concassage est supprimé.

2.3.1 Les granulats de carrière

Ils sont produits à partir de bancs rocheux. Pour le carrier, une bonne connaissance géologique de son gisement peut orienter, du moins dans une certaine mesure, son exploitation vers tel ou tel banc, telle ou telle zone afin de produire des granulats ayant les caractéristiques requises.

L'extraction se fait par abattage à l'explosif, après que la première couche de découverte qui porte principalement sur la terre végétale ait été éliminée au buteur. L'abattage sert à fragmenter le massif afin que le matériau soit repris aisément par les engins et acheminé à l'usine de traitement. Après l'abattage, on procède fréquemment à un précriblage appelé "scalpage". Le scalpage permet d'éliminer les restes de découverte et de roches altérées dans l'abattage [3].

Le matériau scalpé ou non, est ensuite concassé pour être amené à la dimension d'utilisation .

2.3.1.1 Le concassage

Le concassage est la division des matières dures en fragments grossiers. Ce procédé permet de transformer des gros fragments de roches en une série de granulats qui répondent en quantité et en qualité aux divers besoins de l'industrie: granulats pour béton, granulats routiers, etc. Cette opération est réalisée en plusieurs étapes, concassage primaire, secondaire et tertiaire, par exemple, séparés l'un de l'autre par des criblages. Les équipements qui permettent le concassage des blocs rocheux sont appelés concasseurs [3]. Ces appareils de concassage peuvent être classés en deux catégories suivant qu'ils travaillent:

- par écrasement entre deux pièces de concassage;
- par chocs et projections sur des enclumes fixes;

Le choix des concasseurs affectés à ces opérations est évidemment très lourd de conséquences pour le carrier puisque, d'une part les concasseurs représentent un investissement important et, d'autre part, la productivité de l'installation, la qualité et le prix de revient des granulats en dépendent énormément.

Habituellement, le concasseur primaire est un concasseur à mâchoires, les autres étant des giratoires. Cependant, actuellement, on trouve également des concasseurs primaires giratoires. Les concasseurs à mâchoires ou giratoires sont des appareils qui travaillent par écrasement dont une pièce broyante est fixe et l'autre mobile.

a. Concasseurs travaillant par écrasement

Dans cette catégorie d'appareils, on trouve des concasseurs dont une pièce broyante est fixe et l'autre mobile tels que les concasseurs giratoires ou à mâchoires et des concasseurs dont les deux pièces broyantes sont mobiles tels que les concasseurs à cylindres.

- Concasseurs giratoires

Le pied de l'arbre principal étant engagé dans un excentrique, décrit un cercle; sa tête étant fixe, l'arbre décrit un cône autour de l'axe vertical de l'appareil. À mi-hauteur de cet arbre, une pièce broyante, appelée le cône ou la noix, oscille à l'intérieur d'une pièce fixe appelée l'anneau de broyage ou bol. Ainsi, pendant le fonctionnement en charge de l'appareil, le cône roule sur les matériaux, ce qui réduit l'usure des pièces broyantes. Selon la géométrie interne qu'on leur donne, les concasseurs giratoires peuvent être utilisés comme concasseurs primaires, secondaires ou tertiaires [1].

Les concasseurs giratoires primaires présentent de larges ouvertures d'entrée qui leur permettent d'accepter les plus gros blocs. Actuellement, les plus gros appareils en service ont des ouvertures d'admission atteignant dans le sens radial plus de deux mètres, ce qui permet d'admettre des blocs de 10 à 15 tonnes de poids unitaires avec une production pouvant dépasser 3500 t/h. Ces concasseurs ainsi chargés à plein, travaillent constamment au maximum de leur capacité. Le rapport de réduction de ce type de concasseur est de l'ordre de 6 à 8.

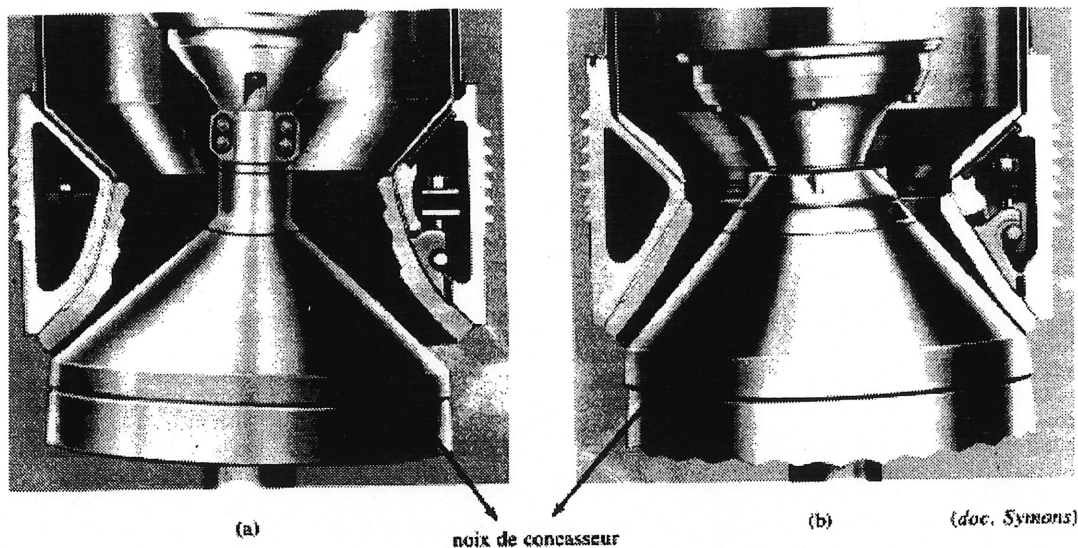


Figure 2.1: Concasseurs giratoires [1].

a. À cône normal

b. À cône court

Les concasseurs giratoires secondaires ne sont pas habituellement utilisés pour fabriquer des matériaux finis. On demande donc à ces appareils d'avoir une capacité de prise aussi grande que possible afin de pouvoir être alimentés sans difficulté. Ils doivent permettre une bonne prise des matériaux et comporter une chambre facilitant l'admission et l'évacuation.

Les concasseurs giratoires tertiaires ou finisseurs sont utilisés lorsque l'on traite des matériaux durs et abrasifs et que l'on veut obtenir des gravillons de bonne cubicité. Divers fabricants se sont penchés sur les améliorations techniques permettant de créer les conditions idéales de production de granulats de qualité. Ces conditions sont les suivantes:

- vitesse d'écrasement bien adaptée pour permettre une meilleure prise des matériaux dans la zone d'alimentation et favoriser une bonne évacuation des produits, et de ce fait obtenir une compacité favorisant l'autobroyage;
- grand nombre de chocs sur toutes les faces des produits surtout dans la zone parallèle de finition (partie de finition de la chambre de broyage) afin de favoriser l'autobroyage et la rupture des éléments longs et plats;
- broyage en milieu dense, compact et homogène.

On voit donc que le mode d'utilisation, les caractéristiques mécaniques du concasseur giratoire et les caractéristiques physiques de sa chambre de concassage ont une influence extrêmement importante sur le rendement et la qualité des produits.

- Concasseurs à mâchoires

Le principe général de ces appareils est le suivant: le matériau est écrasé entre deux mâchoires, l'une mobile et l'autre fixe. Le mouvement de la mâchoire mobile est différent suivant qu'il s'agit d'un appareil à simple ou à double effet.

Les concasseurs à mâchoires à simple effet sont constitués d'un bâti en acier sur lequel est montée la mâchoire fixe. Le balancier, équipé de la mâchoire mobile, est suspendu sur un arbre excentré. Cet arbre est muni de deux volants d'inertie comportant des masses d'équilibrage. L'amplitude de la mâchoire mobile est réglée par l'inclinaison du plan du volet par rapport au plan du balancier. Dans un cycle complet, la mâchoire mobile commence par s'écarter de la mâchoire fixe avec un mouvement ascendant, puis elle se rapproche avec un mouvement descendant qui entraîne les produits vers la sortie.

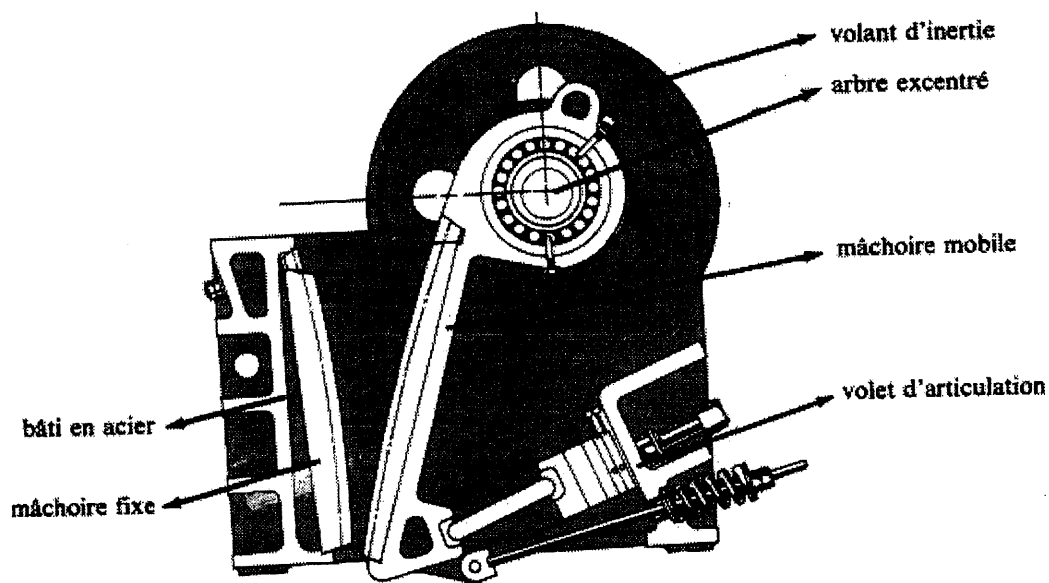


Figure 2.2: Concasseur à mâchoires à simple effet [1].

Un concasseur à mâchoires à double effet comporte un bâti sur lequel sont montés la mâchoire fixe et deux balanciers: l'un, le balancier moteur, entraîné par l'arbre excentrique, décrit des cercles dans sa partie haute, ce qui engendre un mouvement vertical alternatif. Ce mouvement vertical est transformé en un mouvement alternatif horizontal transmis au pied du balancier porte-mâchoire. Le mouvement de la mâchoire mobile est donc purement horizontal, ce qui limite l'usure due au va-et-vient vertical.

Les qualités essentielles de ce type de concasseur sont sa robustesse et sa facilité d'entretien. Par contre, si la roche exploitée est à la fois dure et abrasive, et si le rendement horaire recherché est élevé (≥ 1000 t/h), il est souvent préférable d'utiliser soit un concasseur giratoire, soit un concasseur à choc. Le rapport de réduction de ce type de concasseur est de l'ordre de 4 à 5.

b. Concasseurs travaillant par chocs

Le principe général en est toujours le même. Un rotor tourne à grande vitesse à l'intérieur d'une enceinte fermée équipée de plaques de chocs ou d'enclumes. Le rotor muni d'un certain nombre de pièces de chocs, fixes dans le cas des concasseurs à chocs, mobiles dans le cas des broyeurs à marteaux, projette les matériaux sur les enclumes.

Le concassage s'effectue par chocs des particules sur les percuteurs ou marteau du rotor, par chocs des matériaux entre eux, par chocs des matériaux sur les enclumes.

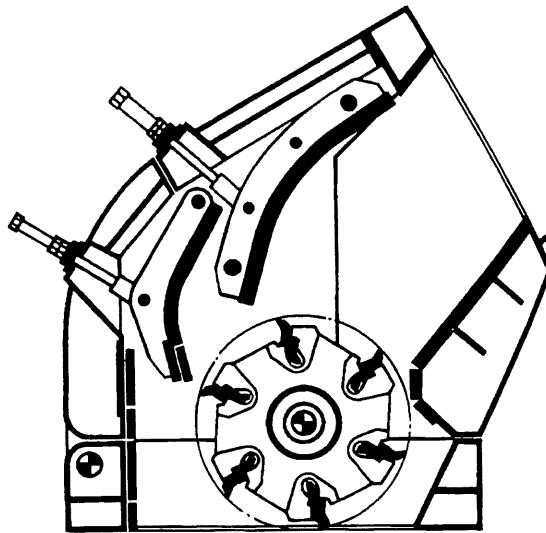


Figure 2.3: Concasseur à choc primaire [35].

Les concasseurs à chocs permettent de très grands rapports de réduction pouvant aller jusqu'à 30, mais produisent un pourcentage important d'éléments fins; par contre, ils sont très sensibles à l'usure lorsqu'on a affaire à des matériaux tant soit peu abrasifs contenant plus de 10 % de silice. Il importe cependant de rappeler que les broyeurs à marteaux permettent d'obtenir des granulats de cubicité inégalable.

Le concasseur «à projection» est un nouveau type de broyeur qui fonctionne par projection. Les granulats à broyer sont introduits par le tube d'alimentation sur la face supérieure du concasseur. Le rotor, tournant à grande vitesse, projette les matériaux à la périphérie, soit sur un matelas de matériaux qui sert d'écran de broyage, soit dans certains cas sur des enclumes interchangeables en métal anti-abrasion. La production comporte un pourcentage important d'éléments fins et la cubicité des particules obtenues est excellente. Ces appareils sont parfois utilisés uniquement en correcteur de forme.

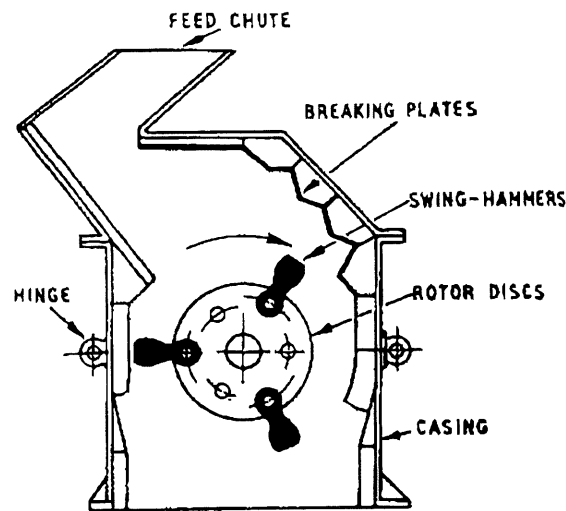


Figure 2.4: Concasseur à projection dit finisseur (ou correcteur de forme) [35].

c. Choix du type de concasseur

Il n'existe pas de concasseur idéal; les différents types de concasseurs que nous venons de décrire présentent des avantages et des inconvénients, compte tenu du type de roche qui doit être traité et de l'utilisation prévue des granulats produits.

Les facteurs qui interviennent lors du choix d'un concasseur sont:

- la dimension des plus gros morceaux des produits d'abattage;
- le débit horaire;
- le rapport de réduction désiré;
- la dureté et l'abrasivité de la roche à traiter;
- la granulométrie désirée des produits fins;
- la forme des produits concassés;

- la consommation d'énergie et la puissance des moteurs;
- les caractéristiques mécaniques du concasseur (rusticité, facilité d'entretien, facilité de remplacement des parties usées par abrasion, facilité des réglages, etc.).

En conclusion, les paramètres tels que les caractéristiques mécaniques de la roche, la granularité du matériau à l'entrée du concasseur, le débit d'alimentation et sa régularité, le réglage du concasseur, ont une grande influence sur la forme, l'angularité, la granularité et le débit du produit de concassage. Il faut donc que les appareils choisis, soient bien réglés et bien utilisés. En particulier, le débit d'alimentation doit varier aussi peu que possible, et pour éviter les dérèglages accidentels, il faut surveiller les concasseurs à l'aide d'instruments de contrôle, ampèremètre, voltmètre, etc.

2.3.1.2 Le criblage

Le criblage est l'opération qui permet de séparer un ensemble de granulats en deux sous-ensembles, l'un contenant les éléments plus gros d'une dimension donnée, l'autre les plus fins.

Le criblage est l'opération complémentaire du concassage. Avant chaque concassage, on commence par éliminer les matériaux qui ont déjà une dimension inférieure à celles des particules les plus petites qui sortiront du concasseur: on parle de précriblage. Cette opération vise plusieurs objectifs:

- augmenter le rendement horaire du concasseur.
- éliminer les particules de roche les plus fragiles qui ont été réduites les premières en particules de petites dimensions.
- limiter l'abrasion dans le concasseur puisque ce sont les particules les plus fines qui causent le plus l'usure du concasseur.

Après le concassage, le système de tamisage, constitué par un empilement de cribles inclinés à mailles carrées ou rectangulaires, permet de séparer les particules selon leur grosseur.

L'efficacité du tamisage dépend des paramètres suivants:

- épaisseur de la couche de matériau sur le crible;
- vitesse de déplacement du matériau;
- fréquence et amplitude de vibration du crible;
- longueur et surface du crible.

D'autres paramètres tels que la proportion de passant, la forme des particules, la teneur en eau du matériau, influent sur les paramètres ci-dessus, compliquant ainsi le problème qui, il faut bien le dire, n'a pas de solution toute faite.

Le système de tamisage peut fonctionner en circuit ouvert, c'est-à-dire qu'aucune des particules qui a été classée n'est retournée vers le concasseur pour y voir sa taille réduite. Il peut fonctionner en circuit fermé avec le concasseur, c'est-à-dire que le refus du tamis supérieur est sans cesse retourné vers le concasseur.

2.3.2 Les granulats alluvionnaires

L'extraction se fait généralement par pelle mécanique en site terrestre et par dragage en site aquatique. Contrairement au cas de l'exploitation en carrière, le concassage est une opération auxiliaire puisqu'on concassera les classes granulaires non demandées pour augmenter les classes déficitaires. Le criblage est, ici, l'opération principale; il est généralement pratiqué dans un courant d'eau, ce qui combine tamisage et lavage.

2.4 LES CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES DES GRANULATS AFFECTANT LEUR QUALITÉ

Le granulat étant un ensemble de particules, il peut déjà être caractérisé géométriquement par la dimension des particules, leur forme, leur granularité. Ces caractéristiques sont estimées par des méthodes qui, en l'état actuel, restent largement empiriques et dont la corrélation avec la tenue des ouvrages n'est parfois pas très claire.

2.4.1 La granulométrie: théorie de la granulation optimale selon Caquot [10]

La dimension d'un élément granulaire est donnée par l'ouverture de la maille carrée d'un tamis, exprimée en millimètres, à travers laquelle il passe juste. La granulométrie est caractérisée par la distribution dimensionnelle des éléments. Elle est déterminée par l'analyse granulométrique par tamisage dans laquelle on détermine la quantité de matériaux utilisés entre chacun des tamis d'une série.

La théorie de la granulation optimale propose de trouver la granularité optimale pour laquelle la porosité du granulat est minimale. Par souci de simplification, nous supposerons que les deux granulats diffèrent par la dimension moyenne de leurs particules et nous appellerons l'un, le gros granulat et l'autre, le granulat fin. Nous désignerons par:

g = le volume absolu du gros granulat, c'est-à-dire la somme des volumes occupés par ses particules;

s = le volume absolu du granulat fin.

Le mélange sera caractérisé, par exemple, par la proportion du gros granulat:

$$n = \frac{g}{g + s}$$

Si l'on cherche à remplir un récipient avec un granulat, une partie seulement du volume disponible est prise par les particules, le reste est le volume des vides. Le rapport entre le volume des vides (v) et le volume de solide est l'indice des vides noté u :

$$u = \frac{v}{g + s}$$

Cet indice caractérise globalement la structure du granulat, désignons alors par:

A = l'indice des vides du granulat fin;

C = l'indice des vides du gros granulat.

Nous souhaitons connaître la variation de u , indice des vides du mélange en fonction de n , proportion du gros granulat. Par définition:

pour $n = 0$ (granulat fin, seul), $u = A$

pour $n = 1$ (gros granulat, seul), $u = C$

Calculons alors la variation de l'indice des vides du mélange en supposant que l'indice des vides de l'un des granulats dans le mélange n'est pas modifié par la présence de l'autre. Si l'on règle les quantités s et g de telle sorte que le volume absolu du mélange soit toujours égal à l'unité, nous aurons alors:

$$s + g = 1$$

donc, $g = n$ et $s = 1 - n$; de plus, le volume des vides du mélange est égal à u .

Partons d'abord du granulat fin et ajustons quelques particules du gros granulat. Cela revient alors à diminuer le volume apparent occupé par le granulat fin. Nous pouvons, en conséquence, écrire:

$$u = A \times s = A \times (1 - n)$$

À l'inverse, partons du gros granulat et ajoutons quelques particules du granulat fin. Par hypothèse, la structure du gros granulat, donc son indice des vides C , reste inchangée. Les particules fines se logent dans les interstices laissés par les gros granulats. Le volume des vides du mélange est alors:

$$u = C \times g - s = C \times n - (1 - n) = (C + 1) \times n - 1$$

On trouve donc deux lois différentes de variations de l'indice des vides suivant qu'on ajoute le granulat fin au gros granulat ou inversement. En fait, nous ne pouvons pas conserver simultanément la structure du gros granulat et celle du granulat fin. Un mélange se comporte alors entre les deux structures et c'est cette interférence qu'il convient d'étudier expérimentalement. Cette situation, illustrée par la Figure 2.5, montre que l'optimum de compacité ou le minimum d'indice des vides est donné par le minimum de la courbe de variation du mélange.

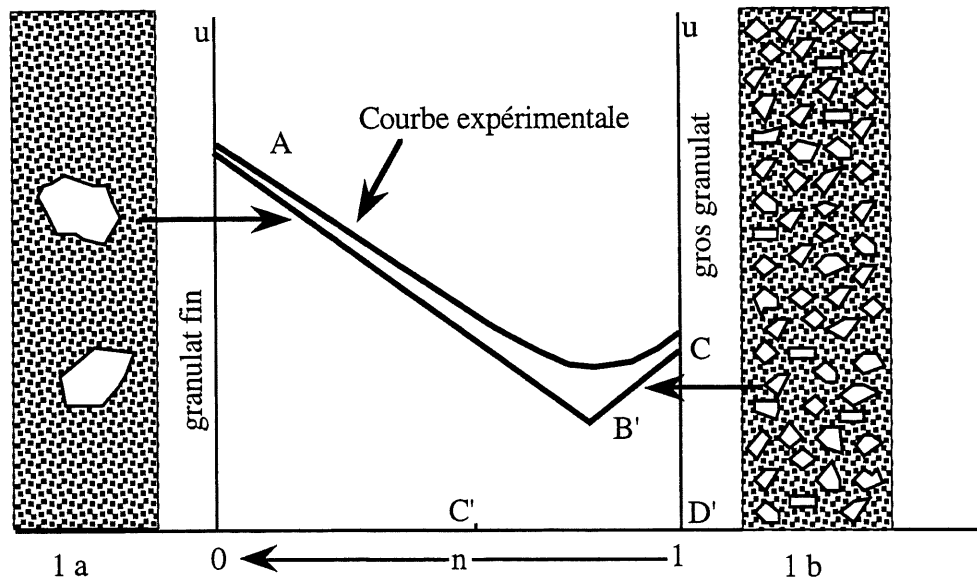


Figure 2.5: Les remplissages théorique et pratique d'un récipient par le mélange de deux granulats [6].

La théorie de la granulation optimale est applicable au mélange indéfini (mélange contenant des particules aussi grosses et aussi petites qu'on veut). La démarche à poursuivre pour aboutir à la granulométrie optimale comporte trois étapes:

1. Établissement de la granulométrie optimale d'un mélange indéfini;
2. Recherche de la correction à appliquer aux proportions d'un mélange dont la dimension des particules est bornée supérieurement;
3. Recherche de la correction à appliquer aux proportions d'un mélange dont la dimension des particules est bornée inférieurement.

Par ces deux corrections, on aboutit à un mélange fini dont les proportions sont voisines de l'optimum.

La théorie de Caquot laisse bien des difficultés en suspens. Mais elle demeure pleine d'enseignements:

- elle met l'accent sur l'interaction entre les granulats;
- elle explique pourquoi la proportion du plus gros granulat doit être majorée;
- elle montre l'importance d'un dosage en éléments fins optimal;
- elle montre que les vides et le dosage en éléments fins varient comme $(\frac{d}{D})^{1/5}$.

où d et D sont respectivement les dimensions du plus fin et du plus gros granulats.

Parallèlement à la théorie de Caquot, les études expérimentales ont montré que la granulométrie et la grosseur maximale des granulats influent sur les proportions relatives des granulats, les quantités de liant et d'eau nécessaires, la maniabilité, la pompabilité, l'économie, la porosité, le retrait et la durabilité du béton. Toute variation de granulométrie influence sérieusement l'uniformité du béton d'une gâchée à l'autre. Les sables très fins sont souvent peu économiques, tandis que les sables et les granulats très grossiers peuvent produire des mélanges raides et peu maniables. En général, ce sont les granulats ne souffrant ni d'une grande carence ni d'un excès de particules de diamètre donné et présentant une courbe granulométrique régulière qui donnent les meilleurs résultats [24]. La variété dans la dimension des particules contribue à réduire le volume total des vides entre les granulats; comme le démontre la méthode simple de la Figure 2.6.

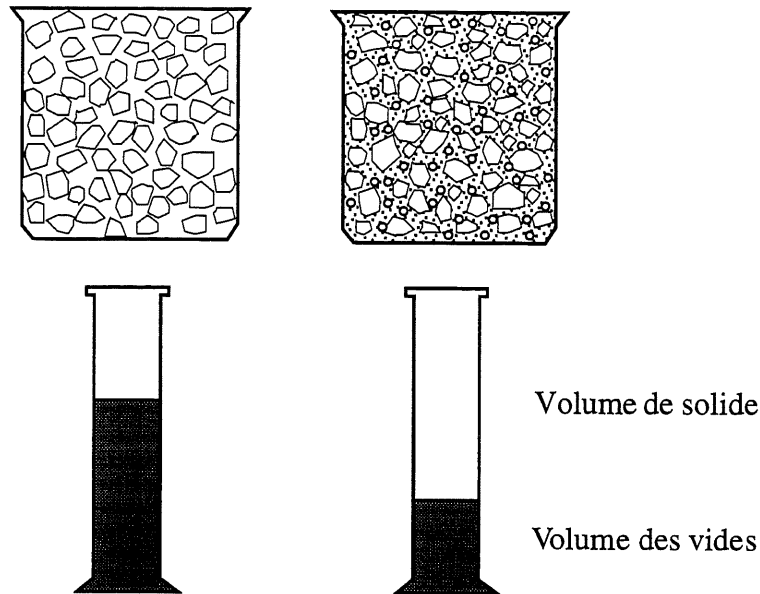


Figure 2.6: Réduction du volume des vides par combinaison de différentes tranches granulométriques [24].

Quand la technologie du béton était à ses débuts, on estimait souhaitable de rechercher une composition de granulats présentant un volume des vides intergranulaires minimal. Cependant, on sait maintenant que ce n'est pas le meilleur objectif à viser lorsqu'on calcule des mélanges de béton. La production de béton à la fois convenable et économique nécessite l'utilisation de granulats ayant un volume de vides intergranulaires faible, mais pas forcément le plus faible [21].

2.4.2 Forme des particules

Le concept de forme comprend trois caractéristiques géométriques [26]:

- La sphéricité : définie comme étant égale au rapport de la surface s de la sphère, ayant le même volume que la particule, à la surface réelle S de la particule:

$$\text{sphéricité} = \frac{s}{S}$$

pour une sphère parfaite, elle est égale à 1; pour n'importe quelle autre forme de particules, elle est inférieure à 1.

- La rondeur : celle-ci mesure l'acuité des côtés et arêtes de la particule.

- La forme : peut être caractérisée de la façon la plus simple par la mesure des trois dimensions élémentaires généralement admises:

1. La longueur L et l'épaisseur E qui sont respectivement la plus grande et la plus petite distance entre deux plans parallèles tangents à la particule,
2. La grosseur G qui est le diamètre minimal du trou circulaire (ou carré pour les tamis) que peut traverser la particule.

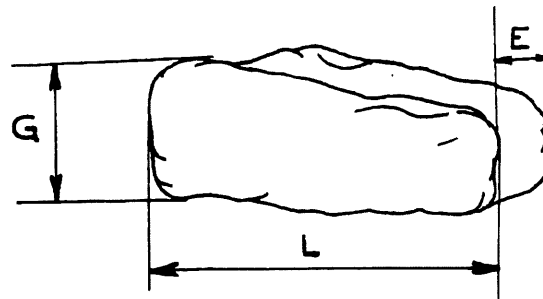


Figure 2.7: Dimensions d'une particule d'un granulat [6].

La distribution de formes reflète les caractéristiques pétrologiques et pétrographiques intrinsèques du granulat ainsi combinées aux facteurs environnementaux de formation (telle que l'érosion: graviers naturels) ou aux facteurs qui conditionnent la production (granulat concassé). La forme des particules peut être regroupée en six catégories: arrondie; irrégulière; anguleuse; plate; allongée; plate et allongée.

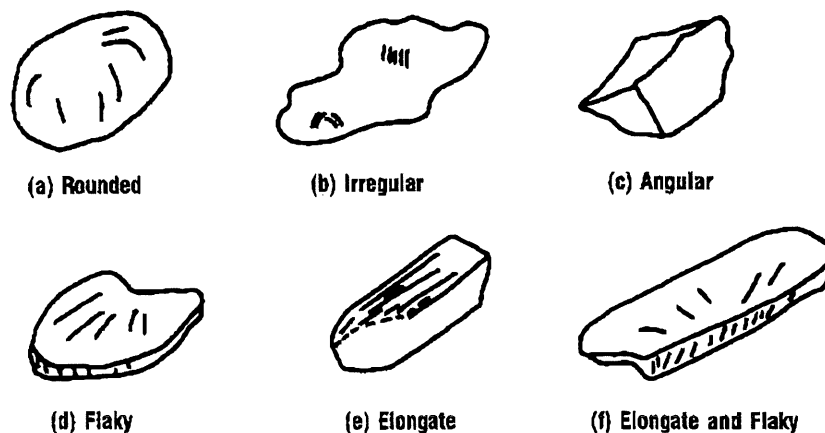


Figure 2.8: Les six catégories de la forme d'une particule
(a) arrondie; (b) irrégulière; (c) anguleuse; (d) plate; (e) allongée; (f) plate et allongée [5].

Dans les catégories arrondie, irrégulière et anguleuse, les particules sont approximativement équidimensionnelles et pour plusieurs raisons, elles sont regroupées ensemble en une catégorie «équidimensionnelle» [22] ou «cubique» [28].

Plusieurs systèmes existant permettent de définir les limites entre les quatre catégories de forme: cubique; plate; allongée; plate et allongée. Dans la description de la forme, nous serons amené à définir l'indice d'aplatissement (I_F) et l'indice d'allongement (I_E).

2.4.2.1 Indice d'aplatissement, I_F [35]

Il est défini pour les granulats de diamètre supérieur à 5 mm. C'est une expression du pourcentage du poids des particules, d'un échantillon d'au moins 200 particules, dont la dimension minimale est inférieure à 0,6 fois la dimension moyenne de l'échantillon. La mesure de cet indice se fait à l'aide de la jauge standard d'aplatissement (Figure 2.9).

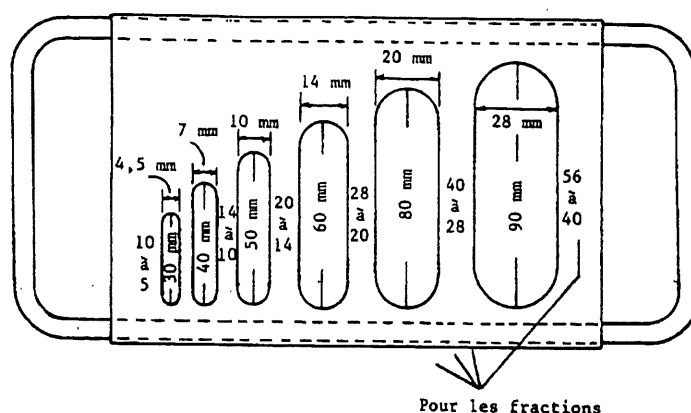


Figure 2.9: Jauge standard d'aplatissement [1].

2.4.2.2 Indice d'allongement, I_E [35]

Il est défini pour les granulats de diamètre supérieur à 5 mm. Il est exprimé par le pourcentage du poids des particules, d'un échantillon d'au moins 200 particules, dont la dimension est supérieure à 1,8 fois la dimension moyenne de la fraction. La jauge standard d'allongement est l'outil qui sert à calculer I_E (Figure 2.10).

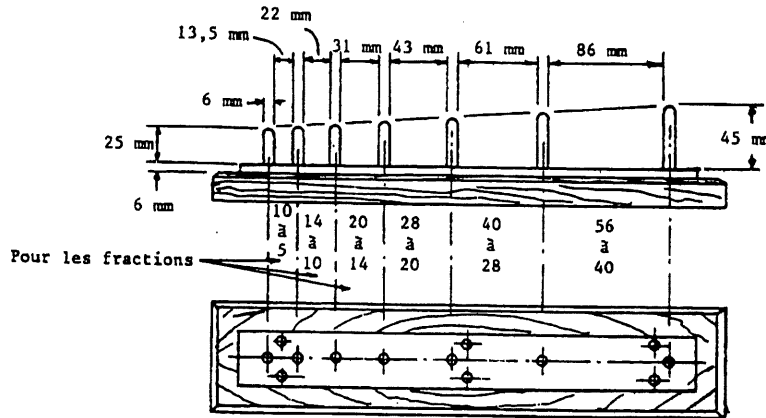


Figure 2.10: Jauge standard d'allongement [1].

2.4.2.3 Discussion

Lees (1964) décrit la forme des particules par deux rapports obtenus à partir des trois dimensions élémentaires L, G et E [22]. Les rapports d'allongement et d'aplatissement sont respectivement: G/L et E/G .

La norme britannique BS limite ces deux rapports à 0,55 et 0,6 respectivement. Ces limites divisent le domaine défini par «rapport d'allongement vs rapport d'aplatissement» en quatre sous-domaines: cubiques, allongées, plates, plates et allongées (Figure 2.11). Cette classification présente l'inconvénient de définir quatre catégories assez larges, si bien que la comparaison entre deux échantillons ayant les mêmes I_F et I_E peut être difficile à interpréter.

La norme ASTM, par contre, définit la forme et la rugosité d'une particule d'un gros granulat par le pourcentage des vides mesuré sur des échantillons préparés à une granulométrie et un degré de compaction donné. Dans l'essai de l'indice de forme et de rugosité des particules d'un granulat (ASTM Method D 3398), chaque fraction est compactée par un pilon standard en utilisant deux niveaux d'efforts de compactage. L'indice de particule est calculé à partir de la formule:

$$I_a = 1,25 \times V_{10} - 0,25 \times V_{50} - 32,0$$

où: I_a = l'indice de particules pour une fraction donné;

V_{10} = le volume des vides quand le granulat est pilonné avec 10 coups/couche;

V_{50} = le volume des vides quand le granulat est pilonné avec 50 coups/couche.

Les quatre catégories de la forme

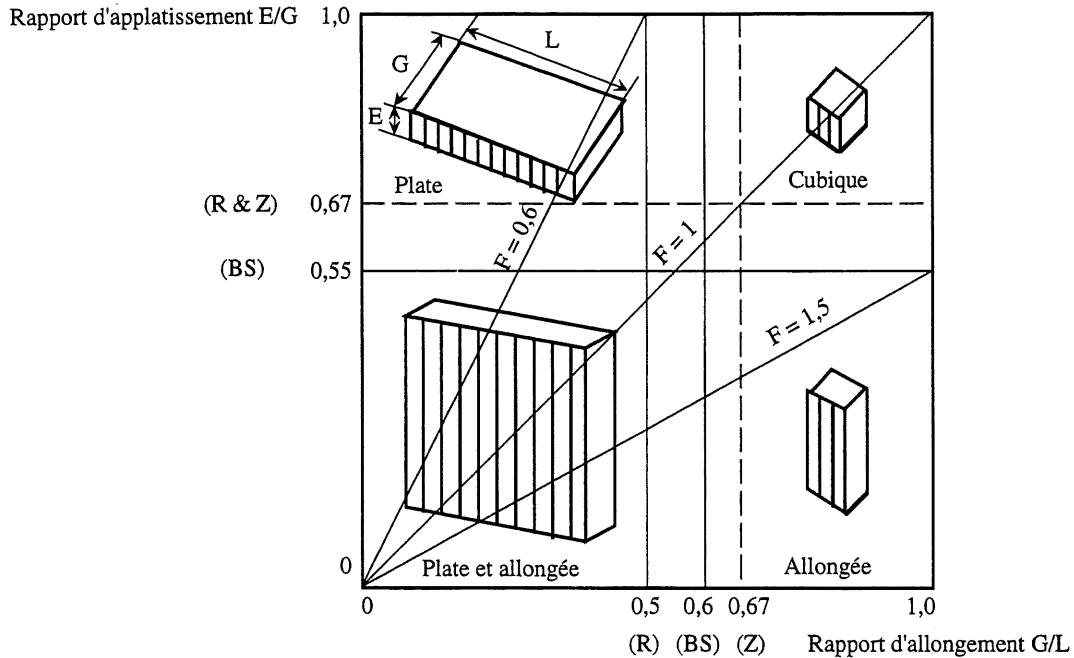


Figure 2.11: Catégories de forme d'une particule définies par des limites arbitraires (R: Ramsay, BS: British Standard et Z: Zingg) [35].

L'indice massique de particule est calculé à partir des résultats de chaque fraction granulaire présente dans l'échantillon.

Pour les granulats fins, le même principe peut être appliqué en mesurant le vide intergranulaire du sable non compacté. L'échantillon à tester doit être sec et préparé en reconstituant la granulométrie standard. À partir d'une hauteur donnée, le sable s'écoule librement à travers un entonnoir pour remplir un contenant standard. Plus le volume des vides mesuré est élevé, plus l'angularité et la rugosité du sable sont élevées -ce qui peut être avantageux pour les sables destinés aux chaussées souples-.

Dans la norme française AFNOR, on trouve la notion du coefficient volumétrique moyen comme caractéristique de la forme «moyenne» d'un granulat. Selon NF P18.301 (1965), le coefficient volumétrique moyen est le rapport du volume absolu d'un granulat à son volume absolu si toutes les particules qui le composent sont des sphères [3]. Il faut bien admettre que la détermination du coefficient volumétrique moyen est un essai très peu pratiqué. Les raisons en sont que, d'une part, les granulats alluvionnaires, qui sont, de loin, les plus utilisés jusqu'à maintenant pour le béton, ont généralement une forme convenable, et que, d'autre part, cet essai est

très long et très fastidieux. Une autre méthode, nettement plus commode et plus rapide, consiste à déterminer le coefficient d'aplatissement du granulat. Ce coefficient est le pourcentage de particules dont la grosseur excède 1,56 fois l'épaisseur. La grosseur des particules est déterminée par l'analyse granulométrique. Le refus sur chaque tamis à mailles carrées est ensuite tamisé sur une grille à fentes parallèles d'ouverture 1,56 fois plus petite que celle de la maille carrée correspondante. Les particules passant à travers la série de grilles à fentes parallèles correspondant à la série de tamis à mailles carrées utilisée sont bien les particules plates qu'il suffit de peser pour en déterminer le pourcentage pondéral.

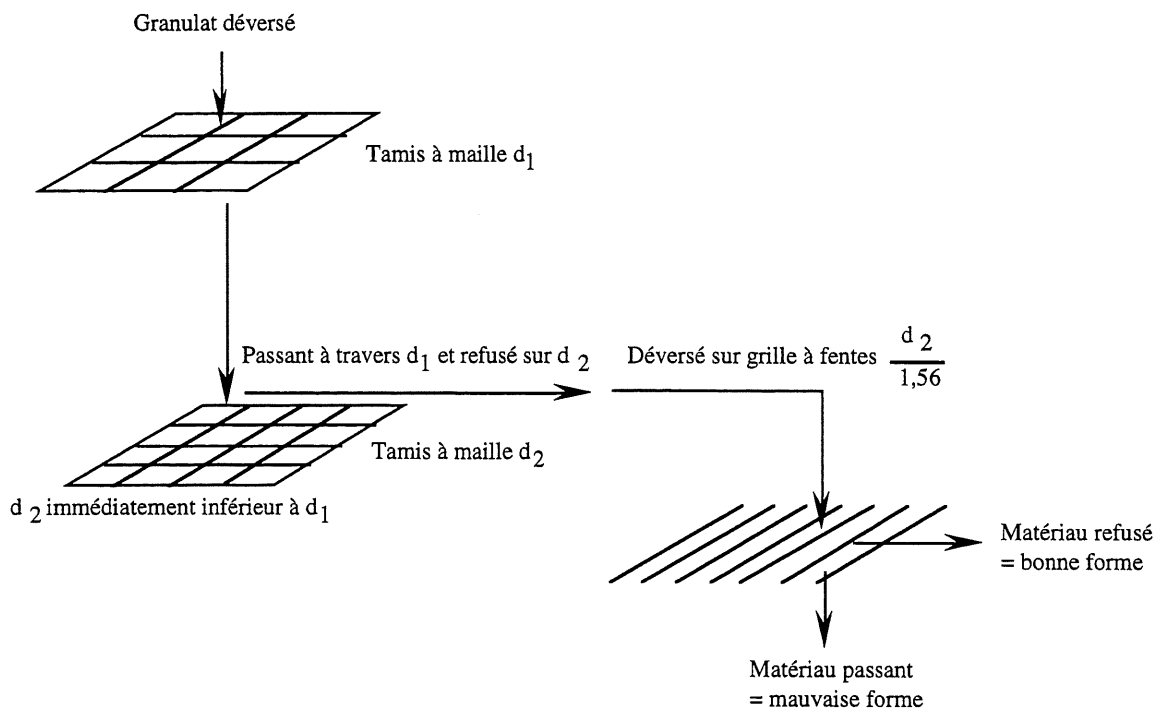


Figure 2.12: Principe de la mesure du coefficient d'aplatissement [3].

En général, les granulats les plus désirables pour le béton sont ceux qui présentent des proportions élevées en particules cubiques (augmentation de la compacité du squelette granulaire) et rugueuses (augmentation de l'adhérence pâte-granulat). Des facteurs intrinsèques tels que la composition de la roche et le procédé de fabrication affectent la forme des granulats concassés. En principe, les roches dures et résistantes ou fragiles produisent une plus grande proportion de particules plates que les roches meubles, malgré que ces dernières génèrent plus de criblure fine [35].

Le type du système de concassage influence fortement la forme du granulat. L'aplatissement peut être occasionné dans le processus de concassage, et pour le minimiser, il est important de

maintenir le rapport de réduction

$$\frac{\text{dimension moyenne de l'alimentation}}{\text{dimension moyenne du produit}}$$

plus faible que 3:1 ou 4:1. La performance des concasseurs, selon le type, a été classifiée dans l'ordre descendant de production de particules cubiques suivant: concasseur à impact, à mâchoires à simple effet, giratoires, à cylindres, à disques et à cônes [35].

2.4.2.4 Amélioration de la forme des particules [16]

La recherche d'une forme idéale des particules du gros granulat peut se faire en agissant à deux niveaux, soit lors du choix du système de concassage, soit lors du choix de la procédure de concassage. Il est bien connu que les concasseurs à impacts produisent généralement des granulats plus cubiques, par contre, ce type de concasseur est plus lourd d'installation et son utilisation ne peut se justifier que lorsque le volume de gros granulats à produire est très important. Il est aussi bien connu que les systèmes mobiles de concassage, comprenant un concasseur primaire à mâchoires et des concasseurs coniques comme concasseurs secondaires (et tertiaires s'il y a lieu), produisent généralement de fortes proportions de particules plates et allongées. Cependant, il est quand même possible de produire un gros granulat composé de particules cubiques avec ce type d'installation à condition de modifier le système de tamisage et de diminuer le débit horaire. Ces précautions peuvent évidemment avoir des répercussions sur les coûts de production. La production d'un gros granulat cubique coûte en général plus cher que celle d'un gros granulat composé essentiellement de particules plates et allongées.

Il sera démontré, dans cette étude, que la forme des particules du granulat fin est encore plus importante que celle du gros granulat lorsque l'on désire fabriquer un BCR. Il est donc toujours préférable d'utiliser un sable naturel roulé plutôt qu'un sable manufacturé dont les particules issues du concassage n'ont pas toujours une forme idéale. Mais alors se pose la question: que faire avec la criblure générée lors du concassage? Il est possible d'améliorer la forme des particules de la criblure en utilisant des broyeurs à barres, comme cela se fait couramment en Europe. En effet, l'épuisement des gisements de granulats fins autour des grands centres urbains européens a obligé les producteurs de granulats à développer des moyens visant à améliorer la forme des grains de criblure pour faciliter leur utilisation, notamment comme sable à béton - lorsque le chantier en vaut la peine pourquoi ne pas faire appel à cette technologie?

CHAPITRE 3

LE CONCEPT DU BÉTON COMPACTÉ AU ROULEAU

3.1 INTRODUCTION

Le béton compacté au rouleau est un béton maigre, sans affaissement et presque sec qui est mis en place à l'aide de béliet mécanique et consolidé à l'aide de rouleaux vibrateurs. C'est un mélange composé de granulats, de ciment et d'eau. Des ajouts minéraux, telles que les cendres volantes, peuvent aussi être utilisés. On malaxe le mélange de façon à le transformer en une masse homogène en utilisant un malaxeur conventionnel, un malaxeur continu et, dans certains cas, un camion malaxeur à tambour basculant.

L'American Concrete Institute décrit le BCR comme un béton maigre et presque sec ayant été consolidé par vibrations externes à l'aide de rouleaux vibrateurs [2].

3.2 LE BCR SELON DEUX APPROCHES

Lors du développement de la technologie BCR, deux approches ont émergé. Il s'agit de l'approche sol, ou géotechnique, et de l'approche béton.

En principe, il n'y a pas de démarcation nette séparant les deux approches. Toutefois, il est intéressant de mentionner que les BCR confectionnés selon l'approche béton sont plus déformables et plus facilement compactables que ceux réalisés selon l'approche sol, quoique les deux approches aboutissent nécessairement à un béton d'affaissement nul.

3.2.1 L'approche sol

L'approche sol considère le BCR comme un sol, ou granulat, traité par enrichissement avec du ciment et dont le dosage est basé sur la relation entre la teneur en eau et la densité. Pour une quantité de granulats et de matériaux cimentaires donnée, l'objectif est de déterminer la teneur en eau optimale, pour un effort de compactage donné qui simule l'effort appliqué par les rouleaux sur le chantier. On admet, selon cette approche, que la pâte du BCR produit ne remplit pas généralement tous les vides entre les particules du granulat après le compactage.

Selon l'approche sol, le dosage du BCR se fait par l'application des principes de compactage développés par PROCTOR. Ces principes précisent que pour un effort de

compactage donné, il existe une teneur en eau optimale à laquelle correspond la densité sèche maximale du BCR. Celle-ci étant calculée à partir de la densité humide par application de la formule suivante:

$$P_s = \frac{P_\omega}{1 + \omega}$$

où P_s = densité sèche, (kg/m³) lb/ft³;
 P_ω = densité humide, (kg/m³) lb/ft³;
 ω = teneur en eau du BCR, exprimée en %.

La résistance à la compression à 7 jours est directement proportionnelle à la densité sèche comme l'illustre la Figure 3.1.

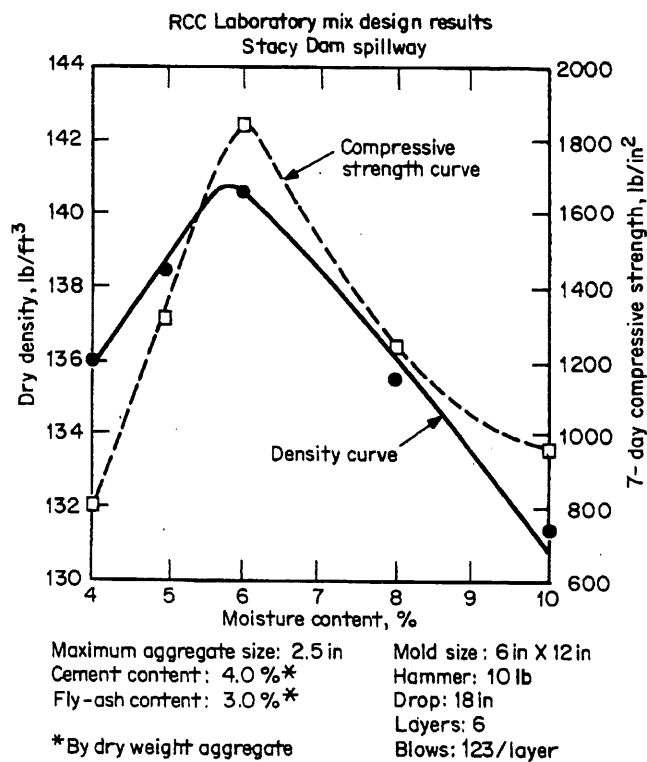


Figure 3.1: Comparaison entre la densité et la résistance à la compression des BCR [18].

3.2.2 L'approche béton

L'approche béton est basée sur le fait que le BCR dispose d'assez de pâte pour remplir tous les vides entre les particules du granulat. Après compactage, il faut toutefois limiter la quantité

de pâte dans le BCR afin d'éviter un affaissement mesurable ou d'éviter que l'excès de pâte puisse monter à la surface après quelques passes du rouleau vibrant.

Selon l'approche béton, le BCR est considéré comme un «vrai» béton dont les résistances et les propriétés mécaniques dépendent directement du rapport eau/liant.

La Figure 3.2 montre que comme pour un béton conventionnel, la résistance d'un BCR complètement compacté est inversement proportionnelle au rapport eau/liant.

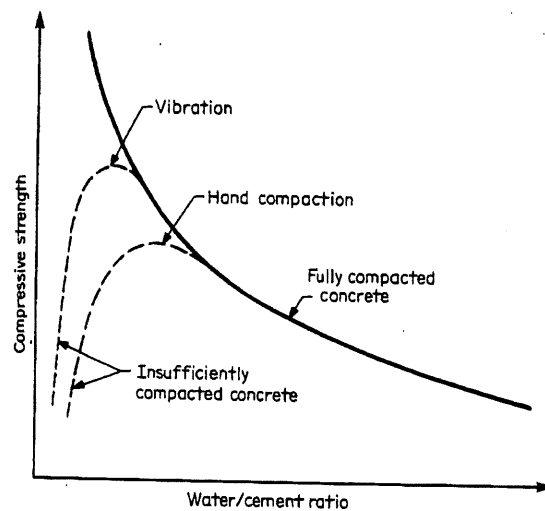


Figure 3.2: Relation générale entre la résistance à la compression et le rapport eau/liant [25].

3.3 LES CONSTITUANTS D'UN BCR

Les constituants d'un BCR incluent les matériaux cimentaires (ciment portland, pouzzolanes et autres ajouts minéraux comme les cendres volantes), les granulats, l'eau et les adjuvants.

3.3.1 Matériaux cimentaires

Le type et le dosage des matières cimentaires à utiliser dans un BCR dépendent du volume de l'ouvrage, des propriétés mécaniques visées et des conditions d'exposition.

Dans le cas des grands barrages, les ingénieurs choisissent généralement des liants à faible chaleur d'hydratation tels que le ciment de type 20, le ciment portland avec pouzzolanes (ASTM C595, Type IP) ou le ciment de type 50 (si l'ouvrage est exposé à des eaux agressives) [18].

La sélection des pouzzolanes dépend principalement de leurs performances dans le béton, de leur coût et de leur disponibilité.

La quantité de matériaux cimentaires utilisée dans un BCR pour barrage varie considérablement en fonction du niveau de performance visé. Elle est généralement comprise entre 60 kg/m^3 (barrage Urugua-i, Argentine) et 248 kg/m^3 (barrage Upper Stillwater, E.-U.) [18].

3.3.2 Granulats

Deux caractéristiques du granulat ont une grande importance dans le dosage d'un BCR car elles ont un effet direct sur la maniabilité. Ce sont:

- la granulométrie (grosseur et distribution des particules);
- la nature des particules (forme, porosité, texture superficielle).

D'autres caractéristiques telles que la dimension maximale du granulat (DMG), la proportion du sable dans le mélange et le pourcentage des particules fines passant le tamis $80 \mu\text{m}$ ont aussi un impact direct sur les propriétés du BCR à l'état frais ou durci. On peut diminuer la tendance à la ségrégation en augmentant la proportion de sable et en diminuant la DMG.

Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés. La DMG est généralement inférieure à 100 mm.

3.3.3 Eau

Le principal critère du choix de l'eau de gachage est qu'elle ne doit pas comporter des teneurs trop élevées en alcalis, acides ou matières organiques pouvant affecter le gain de résistance.

Le dosage en eau du BCR est, lui aussi, très variable en fonction du niveau de performance visé. La plupart des BCR pour barrage sont fabriqués avec des dosages en eau compris entre 90 et 120 L/m^3 pour des DMG supérieures à 50 mm [18].

3.3.4 Adjuvants

La performance des agents entraîneurs d'air et des réducteurs d'eau est considérablement réduite dans le cas des BCR, particulièrement avec ceux formulés selon l'approche sol. La consistance très sèche et la grande quantité des particules fines compliquent la production d'un bon réseau de bulles d'air pour n'importe quel dosage. Dans le cas des BCR formulés selon

l'approche béton, les adjuvants chimiques sont généralement plus efficaces. Des recherches récentes ont révélé que l'utilisation d'un réducteur d'eau occasionne une perte de résistance à jeune âge et un gain de résistance à long terme. Des dosages relativement élevés de 0,87 à 1,3 kg par 100 kg de ciment donnent de bons résultats [18].

3.4 DOSAGE DES BCR

Il n'existe pas de procédure normalisée pour formuler un BCR pour barrage. Plusieurs méthodes différentes ont déjà été utilisées avec succès. Le choix d'une méthode de formulation dépend du type de BCR à produire.

Deux procédures de dosage seront présentées. Il s'agit de la procédure de dosage selon les concepts de compactage des sols (approche sol) et de la procédure de dosage pour les BCR riches en liants (approche béton).

3.4.1 Formulation selon les concepts de compactage des sols (approche sol)

Le principe de cette procédure est similaire à celui utilisé pour les sols enrichis avec du ciment. Le but est d'obtenir une densité sèche maximale du BCR en suivant une procédure de compactage de type Proctor modifié [18].

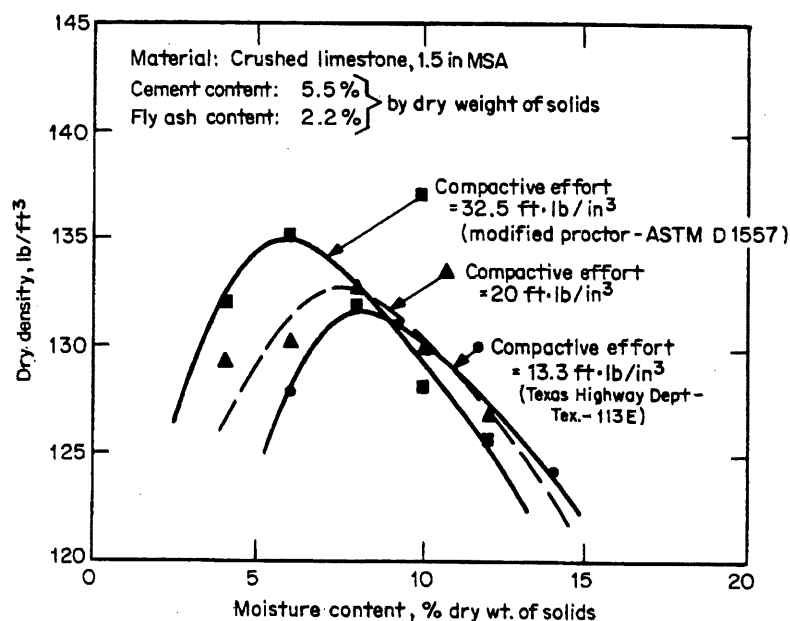


Figure 3.3: Relations densité vs. teneur en eau pour des BCR consolidés à différentes énergies de compaction [29].

Partant d'une granulométrie fixée du granulat, le programme expérimental consiste à réaliser plusieurs BCR en faisant varier les teneurs en eau et en matériaux cimentaires. Pour chaque teneur en matières cimentaires, on détermine la teneur en eau optimale qui permet d'obtenir la densité sèche maximale avec un effort de compactage similaire à celui utilisé au chantier. La teneur optimale en matériaux cimentaires est ensuite choisie en se basant sur les résultats d'essais de compression simple.

Il importe de mentionner que les teneurs en eau et en matériaux cimentaires (en masse) sont exprimées comme pourcentage de la masse sèche des granulats. Elles varient donc considérablement en fonction de la masse spécifique des matériaux et de leur absorption.

3.4.2 Formulation des mélanges riches en liants (approche béton) [4]

La procédure de dosage des mélanges riches en liants a été développée par Dunstan et modifiée par le "U.S. Bureau of Reclamation". Cette méthode est surtout utilisée pour formuler des BCR possédant des résistances mécaniques plus élevées, une perméabilité relativement faible et une meilleure adhérence entre les couches. Pour satisfaire à ces exigences, des teneurs en matériaux cimentaires relativement élevées sont utilisées. On doit cependant porter une plus grande attention aux changements volumétriques dus à la chaleur d'hydratation générée par les matériaux cimentaires. On peut diminuer le dégagement de chaleur en substituant une partie du ciment par des pouzzolanes telles que les cendres volantes.

Les étapes à suivre pour formuler un BCR selon l'approche béton sont les suivantes:

Étape 1: déterminer toutes les exigences influençant les propriétés du BCR, à savoir:

1. résistances mécaniques.
2. conditions d'exposition.
3. limite maximum du rapport eau/ciment.
4. exigences sur les ajouts.
5. DMG, source et qualité.
6. temps Vebe.

Étape 2: déterminer les propriétés des matériaux sur des échantillons représentatifs.

1. granulométrie du granulat.
2. densité du granulat saturé superficiellement sec (SSS) et absorption du granulat.
3. qualité du granulat.
4. propriétés physiques et chimiques du ciment et des pouzzolanes s'il y a lieu.

Étape 3: sélectionner le rapport eau/ciment requis pour arriver aux résistances visées en utilisant la valeur minimum du rapport spécifié dans le projet et du rapport donné par la Figure 3.4.

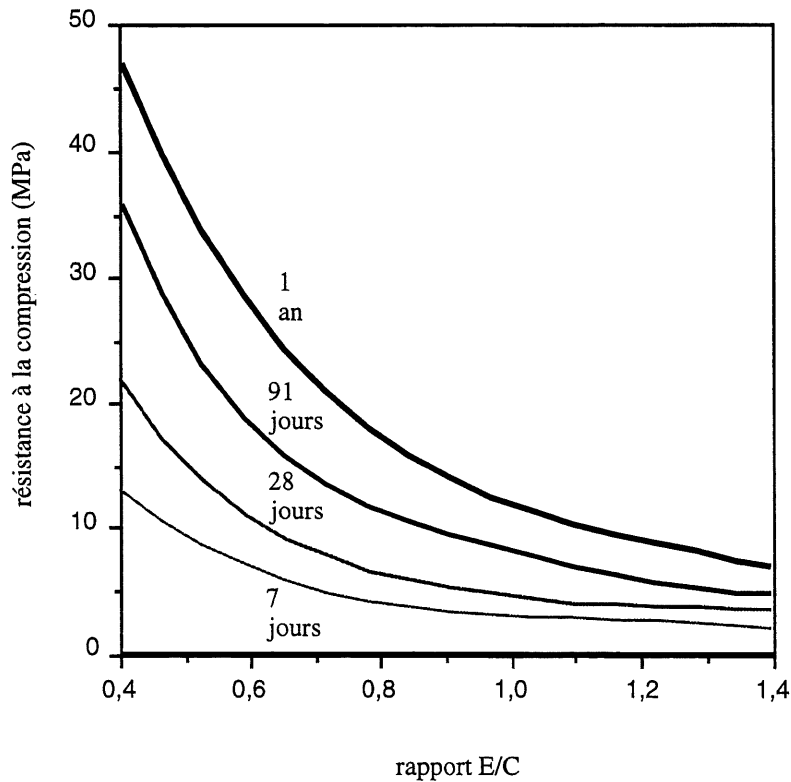


Figure 3.4: Résistance à la compression du BCR en fonction du rapport E/C [4].

Étape 4: en se basant sur le temps Vebe VC (Voir paragraphe 5.2.4), estimer la teneur en eau et la teneur en air entrappée (Tableau 3.1).

Tableau 3.1: Teneurs en eau et en air approximatives pour différentes DMG (BCR sans air entraîné) [4].

Niveau du temps Vebe, sec	Teneur en eau, kg/m ³		
	19,0 mm	37,5 mm	75 mm
10 - 16	149 - 158	113 - 163	92 - 169
17 - 25	133 - 160	93 - 133	85 - 119
teneur en air (%)	1,5 - 2,7	0,2 - 2,23	0,5 - 3,1

Étape 5: évaluer la teneur en ciment à partir du rapport eau/ciment et de la teneur en eau. Comparer cette valeur calculée à celle donnée par la Figure 3.5 et ajuster la valeur calculée si nécessaire. En se basant sur l'équivalent du volume absolu du ciment, on calcule les teneurs en ciment et en pouzzolanes.

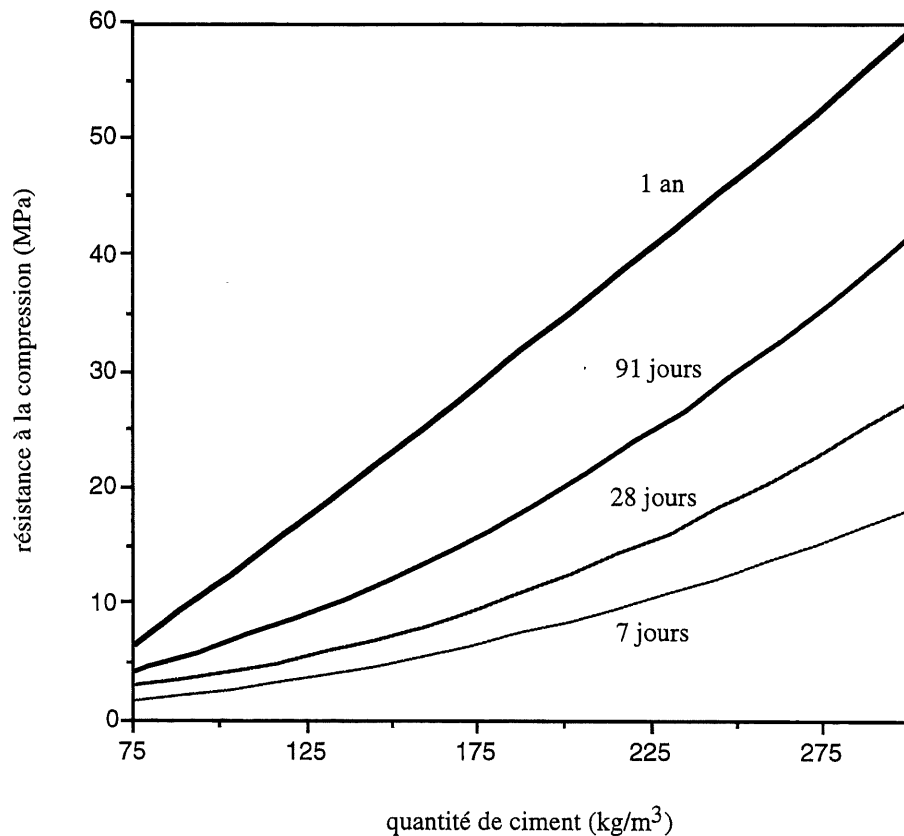


Figure 3.5: Résistance à la compression du BCR en fonction de la quantité de ciment [4].

- Étape 6: déterminer la proportion de chaque fraction du gros granulat afin que sa granulométrie s'approche de la granulométrie idéale du gros granulat donnée par le Tableau 3.2.
- Étape 7: comparer la granulométrie du granulat fin aux limites recommandées illustrées dans le Tableau 3.3. Si nécessaire utiliser des pouzzolanes pour rencontrer ces limites.

Tableau 3.2: Granulométrie idéale du gros granulat [4].

Ouverture du tamis	Passant cumulatif (%)		
	4,75 - 75 mm	4,75 - 37,5 mm	4,75 - 19,0 mm
75 mm	100	-	-
63 mm	88	-	-
50 mm	76	-	-
37,5 mm	61	100	-
25,0 mm	44	72	-
19,0 mm	33	55	100
12,5 mm	21	35	63
9,5 mm	14	23	41
4,75 mm	-	-	-

Tableau 3.3: Fuseau granulométrique recommandé pour les granulats fins [4].

Ouverture du tamis	Passant cumulatif (%)
9,5 mm	100
4,75 mm	95 - 100
2,36 mm	75 - 95
1,18 mm	55 - 80
600 m	35 - 60
300 m	24 - 40
150 m	12 - 28
75 m	8 - 18
module de finesse	2,10 - 2,75

Tableau 3.4: Rapport du volume des granulats fins sur le volume total occupé par les granulats [4].

DMG et type du gros granulat	Rapport du V du sable sur le V_{tot} du granulat
75 mm, concassé	0,29 - 0,36
75 mm, roulé	0,27 - 0,34
37,5 mm, concassé	0,39 - 0,47
37,5 mm, roulé	0,35 - 0,45
19,0 mm, concassé	0,48 - 0,59
19,0 mm, roulé	0,41 - 0,45

- Étape 8: calculer les volumes absolus et les densités (SSS) de tous les ingrédients pour 1 m³ de BCR.
- Étape 9: calculer le volume de mortier (V_m) et le comparer aux valeurs données par le Tableau 3.5. Ajuster la teneur en granulat fin pour s'approcher de la valeur moyenne correspondant au type de gros granulat et de la DMG.
- Étape 10: calculer le volume de pâte (V_p) et le rapport V_p/V_m. La valeur minimale que doit prendre ce rapport est 0,42 pour assurer le remplissage du vide intergranulaire par la pâte. Si nécessaire, ajouter du ciment ou des particules fines passant le tamis 80 µm.

Tableau 3.5: Quantité de mortier approximative [4].

DMG et type du gros granulat	Quantité de mortier (L/m ³ de BCR)
75 mm, concassé	38,1 - 56,7
75 mm, roulé	37,4 - 55,2
37,5 mm, concassé	43,3 - 67,4
37,5 mm, roulé	44,8 - 68,9
19,0 mm, concassé	64,1 - 78,9
19,0 mm, roulé	donnée non disponible

- Étape 11: évaluer la maniabilité et la résistance du BCR ainsi obtenu.

Cette méthode de formulation est utilisée lorsqu'il s'agit de construire des barrages en BCR qui seront exposés à l'érosion ou à l'abrasion. Le BCR produit possède des résistances mécaniques relativement élevées. Cependant, c'est une méthode empirique, basée sur une banque de données restreinte, qui n'est pas très précise. Elle ne permet généralement pas de produire des BCR dont le temps Vebe respecte les exigences énumérées à l'étape 1.

3.5 PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET PHYSIQUES DU BCR

Les propriétés du BCR dépendent directement de la qualité des matériaux utilisés, des proportions du mélange et du degré de compaction ou consolidation. Les propriétés élastiques et thermiques du BCR sont similaires à celles d'un béton conventionnel fabriqué à partir des mêmes constituants.

Le dosage selon l'approche sol conduit à la fabrication de BCR comportant généralement plus de vides de compaction. Les propriétés mécaniques de ce type de BCR sont donc étroitement liées au degré de compaction et à l'énergie de compactage.

3.5.1 Les propriétés mécaniques

Les propriétés du BCR obtenu à partir de carottes prélevées dans les barrages sont considérées plus représentatives des propriétés effectives du matériau que de celles mesurées à partir d'éprouvettes fabriquées au laboratoire.

3.5.1.1 Résistance à la compression

La résistance à la compression est surtout fonction de la quantité des matériaux cimentaires, des propriétés des granulats, du degré de compaction et de la teneur en eau (Voir Figures 3.6, 3.7 et 3.8).

La Figure 3.6 montre l'influence de la teneur en eau et du degré de compaction sur la résistance à la compression du BCR. Une fois ces deux variables fixées, la résistance à la compression augmente avec le temps et avec l'augmentation de la quantité des matériaux cimentaires comme le montre la Figure 3.7.

La relation entre la résistance à la compression et le rapport eau/liant d'un béton conventionnel reste vraie pour les BCR formulés avec un volume de pâte excédant le volume du vide intergranulaire (approche béton). Cependant, cette relation cesse d'être appliquée dans le cas des BCR formulés selon l'approche sol pour lesquels les vides intergranulaires ne sont que partiellement remplis par la pâte.

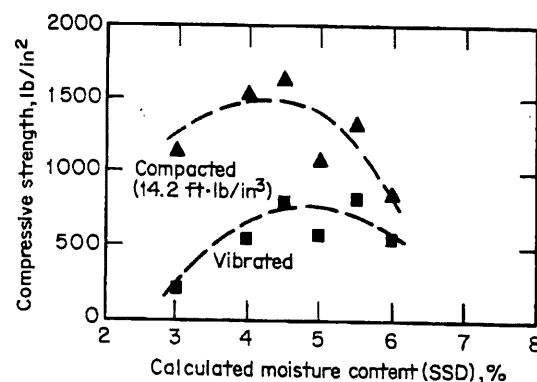


Figure 3.6: Comparaison entre la résistance à la compression à 7 jours d'un BCR compacté et d'un autre vibré [36].

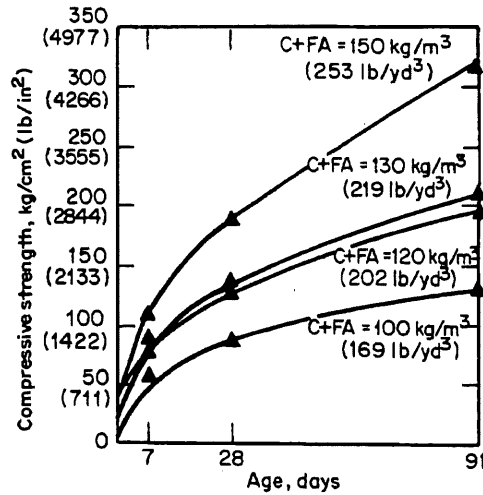


Figure 3.7: Relation entre la résistance à la compression vs. la teneur en liant en fonction de l'âge du BCR [39].

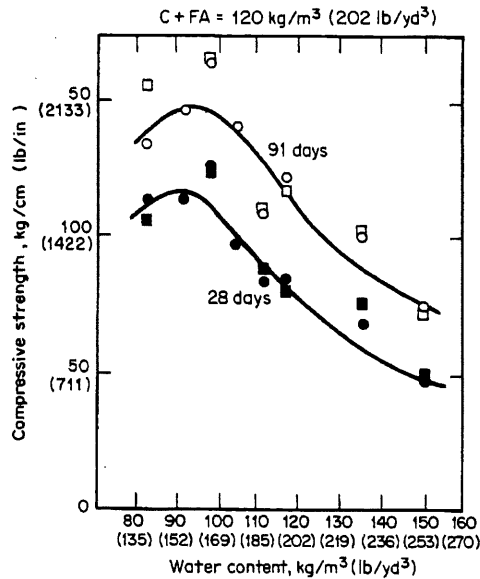


Figure 3.8: Relation entre la teneur en eau et la résistance à la compression des BCR [19].

3.5.1.2 Résistance à la traction

La résistance à la traction du BCR, mesurée avec l'essai brésilien représente approximativement 12 à 14% de sa résistance à la compression. La résistance à la traction du BCR peut donc varier considérablement d'un mélange à un autre. La variabilité de l'essai est plus grande dans le cas du BCR que dans le cas du béton conventionnel.

Comme pour le béton conventionnel, l'augmentation de la quantité des matériaux cimentaires, la diminution de la teneur en eau et l'utilisation de granulats concassés (à surfaces rugueuses) tendent à augmenter la résistance à la traction du BCR [18].

3.5.1.3 Résistance au cisaillement

La construction des barrages en BCR consiste à appliquer plusieurs couches horizontales successives dont l'épaisseur varie entre 0,3 et 0,6 m. Pour le concepteur, la résistance au cisaillement à l'interface entre deux couches est plus importante que la résistance au cisaillement propre du matériau. Dans ce sens, les concepteurs choisissent généralement d'augmenter le plus possible le rapport pâte/mortier afin d'assurer une meilleure adhérence intercouches et de diminuer les infiltrations à travers le barrage en service.

La résistance au cisaillement du BCR dépend de sa cohésion et de son angle de frottement interne. La résistance au cisaillement minimale est généralement mesurée au niveau des joints de construction et le long de l'interface entre les couches successives de BCR.

3.5.2 Perméabilité

La perméabilité du BCR est certainement une de ses propriétés les plus importantes. Dans les barrages existants, la perméabilité du BCR varie de 10^{-4} cm/s à 10^{-12} cm/s, comme on peut le voir

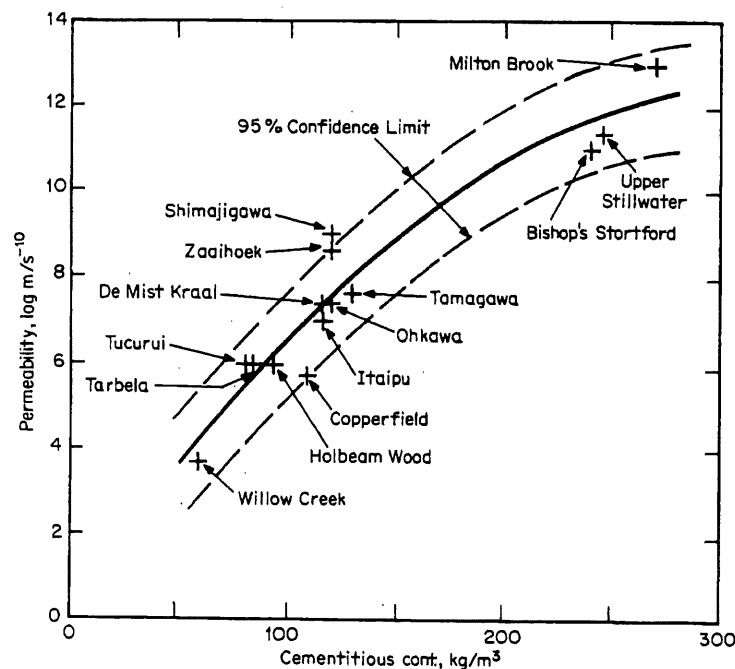


Figure 3.9: Relation entre la perméabilité du BCR et sa teneur en liant [18].

sur la Figure 3.9. Cependant, le "U.S. Bureau of Reclamation" exige une perméabilité inférieure à $1,5 \times 10^{-9}$ cm/s pour les barrages en béton conventionnel. Cette limite reste valable pour les barrages en BCR puisqu'à toute fin pratique la fonction d'un barrage est la même, indépendamment du matériau qui a servi dans sa construction.

Une bonne imperméabilité peut être obtenue en augmentant la teneur en matériaux cimentaires, le degré de compaction et en utilisant des particules fines ayant une granulométrie bien étalée.

3.5.3 Durabilité

La durabilité du BCR est importante lorsque l'ouvrage est exposé à des conditions climatiques (cycles de gel-dégel) sévères.

3.5.3.1 Résistance au gel-dégel

Le BCR possède généralement une bonne résistance au gel-dégel lorsque ses propriétés mécaniques et sa compacité sont élevées. On peut améliorer la durabilité au gel des BCR en entraînant un réseau de bulles d'air approprié [18]. Cette opération est cependant difficile à réaliser en raison de la grande cohésivité du matériau et de sa teneur en eau très faible surtout pour les BCR formulés selon l'approche sol. La présence d'un réseau de bulles d'air entraîné améliore la maniabilité et diminue les risques de ségrégation du BCR [18].

La quantité de matériaux cimentaires nécessaire pour produire un BCR durable peut être supérieure à celle qui est strictement requise pour atteindre la résistance à la compression spécifiée [18].

3.5.3.2 Résistance à l'érosion

La résistance à l'érosion du BCR est proportionnelle à sa résistance à la compression et à la résistance à l'abrasion des granulats. Des résultats obtenus en laboratoire et en chantier ont montré que les BCR peuvent avoir une très bonne résistance à l'érosion [18].

3.5.3.3 Changement volumétrique

Dans les structures massives, les propriétés thermiques du béton dépendent directement de celles du gros granulat utilisé. Pour les barrages en BCR, on doit bien contrôler les changements volumétriques, en utilisant des granulats présentant de faibles coefficients d'expansion, afin de minimiser la fissuration et les problèmes d'étanchéité et de stabilité qui en

découlent. Les granulats qui possèdent des conductivités élevées sont aussi indésirables car ils favorisent le développement d'un gradient thermique élevé entre le cœur et la peau du béton.

On peut aussi minimiser le dégagement thermique, en diminuant la diffusivité du BCR (paramètre physique qui mesure le transfert de masse, surtout des ions, à travers le BCR), en cours d'hydratation en utilisant des ciments à faible chaleur d'hydratation (Type 20M) et des cendres volantes. On doit aussi viser une teneur en matériaux cimentaires la plus faible possible pour limiter le retrait. Le retrait du BCR est principalement fonction de la quantité d'eau de gâchage et de la teneur en matériaux cimentaires. Dans les barrages en BCR riches en liants, des joints de retrait sont, souvent, placés le long de la structure à des intervalles généralement de 15 m et plus. Le rôle principal des joints de retrait est de contrecarrer l'effet des contraintes de tension créées par le retrait.

Des valeurs typiques des propriétés thermiques du BCR sont données dans le Tableau 3.6 ci-dessous:

Tableau 3.6: Valeurs typiques des propriétés thermiques des BCR [18].

Barrages	Diffusivité ($\text{m}^2/\text{h}) \times 10^{-3}$	Conductivité ($\text{kcal}/\text{m}/\text{h} \cdot ^\circ\text{C}$)	Coefficient d'expansion ($\text{mm}/\text{mm} \cdot ^\circ\text{C} \times 10^{-6}$)
Pamo (granite)	3,55	1,76	5,93
Willow Creek (basalt)	2,8	1,56	7,0
Saco de Nova Olinda	1,71	-	10,57

CHAPITRE 4

BUT DE LA RECHERCHE ET PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

4.1 BUT DE LA RECHERCHE

Les granulats constituent le squelette du béton compacté au rouleau (environ 85% en volume), qui doit être le plus compact et le plus durable possible. Il est bien connu que les caractéristiques géométriques des particules d'un granulat (forme des particules) et leurs caractéristiques minéralogiques et physiques (qui définissent l'état de surface des particules) sont des paramètres qui affectent d'une part la façon avec laquelle les particules du granulat s'empilent (ce qui affecte la compacité du mélange granulaire) et d'autre part la résistance et l'épaisseur de la zone d'interface pâte-granulat (dépendamment de la rugosité de la surface des particules). Si un mélange granulaire n'est pas assez compact, le volume de pâte qu'il faut lui incorporer, pour atteindre une maniabilité donnée, sera élevé. Le béton compacté au rouleau est un béton de masse qui nécessite un meilleur contrôle de la compacité du mélange granulaire (afin de minimiser la demande en pâte) et de la surface des particules (pour avoir une bonne zone d'interface pâte-granulat et une bonne imperméabilité). L'optimisation de la compacité du mélange granulaire est donc nécessaire, dans le cas des BCR, pour produire le béton à un prix raisonnable et atteindre les meilleures performances.

Dans le cadre de ce projet de recherche, on se propose donc:

- d'étudier l'influence de la forme et de la rugosité des particules sur l'indice des vides du mélange granulaire (en outre sur sa compacité), sur les principales propriétés du BCR fabriqué à partir de ce même mélange granulaire et ses répercussions financières.
- d'évaluer la pénalisation (réduction de la maniabilité, augmentation de la teneur en liant) que pourrait entraîner l'utilisation d'un granulat comportant une forte proportion de particules plates et allongées.

Ces données devraient permettre de mieux évaluer dans quelle mesure il peut être économiquement et techniquement avantageux d'optimiser le système de concassage pour diminuer le coût d'un BCR.

4.2 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

4.2.1 Essais sur mélanges granulaires

L'étude expérimentale se fera sur des mélanges granulaires ayant tous une granulométrie très voisine mais qui diffèrent de par la forme et/ou la rugosité de leurs particules. Pour chaque fraction de ces mélanges granulaires, on déterminera le pourcentage des particules plates et/ou allongées, les masses volumiques maximales (ρ_{\max}) et minimales (ρ_{\min}) ainsi que la masse volumique pilonnée ($\rho_{\text{pilonnée}}$). La détermination de ρ_{\max} et de $\rho_{\text{pilonnée}}$ est nécessaire pour le calcul de l'indice des vides des granulats compactés et pilonnés (I_{vc} et I_{vp}). Ensuite, on va tenter de dégager les relations entre chacun de ces indices des vides et le pourcentage de particules plates et/ou allongées. L'analyse de telles corrélations nous permettra d'une part de savoir dans quelle mesure les caractéristiques géométriques, minéralogiques et physiques d'un granulat peuvent affecter sa compacité et d'autre part de reconnaître, lequel parmi ces deux indices des vides, est ce que nous pourrions appelé l'indice indicateur de forme et de rugosité des particules.

4.2.2 Essais sur le BCR

Les mêmes mélanges granulaires seront utilisés, par la suite, pour fabriquer des BCR. Tous les bétons seront fabriqués avec un ciment type 20M, des cendres volantes de classe F et un agent réducteur d'eau. La formulation des BCR sera voisine de celle retenue dans le projet du Lac Robertson d'Hydro-Québec (situé sur la basse Côte-Nord). La maniabilité et la masse volumique des BCR seront déterminées selon la norme en vigueur. À partir des formulations corrigées, nous calculerons, pour chaque BCR, le volume de pâte qu'il renferme et le taux de remplissage des vides de compactage du mélange granulaire correspondant (le rapport entre le volume de pâte dans le BCR et le volume des vides après compactage du mélange granulaire: VP/V_{vc}). Par la suite, Nous dégagerons la relation qui existe entre la maniabilité du BCR (temps Vebe) et le taux de remplissage des vides de compactage. Enfin, nous corrigerons la maniabilité des BCR les plus raides en ajoutant plus de pâte à leurs matrices originelles. Cette façon de faire nous permettra d'évaluer la pénalisation (en terme de volume de pâte que nous ajouté pour compenser la perte de maniabilité) occasionnée par l'utilisation d'un granulat dont la forme et la rugosité ne sont pas optimales. Les cylindres fabriqués à partir de ces BCR seront testés à 28 et 91 jours pour identifier si la résistance en compression, le module élastique et la perméabilité à l'eau sont affectés par la forme et la rugosité des particules du granulat.

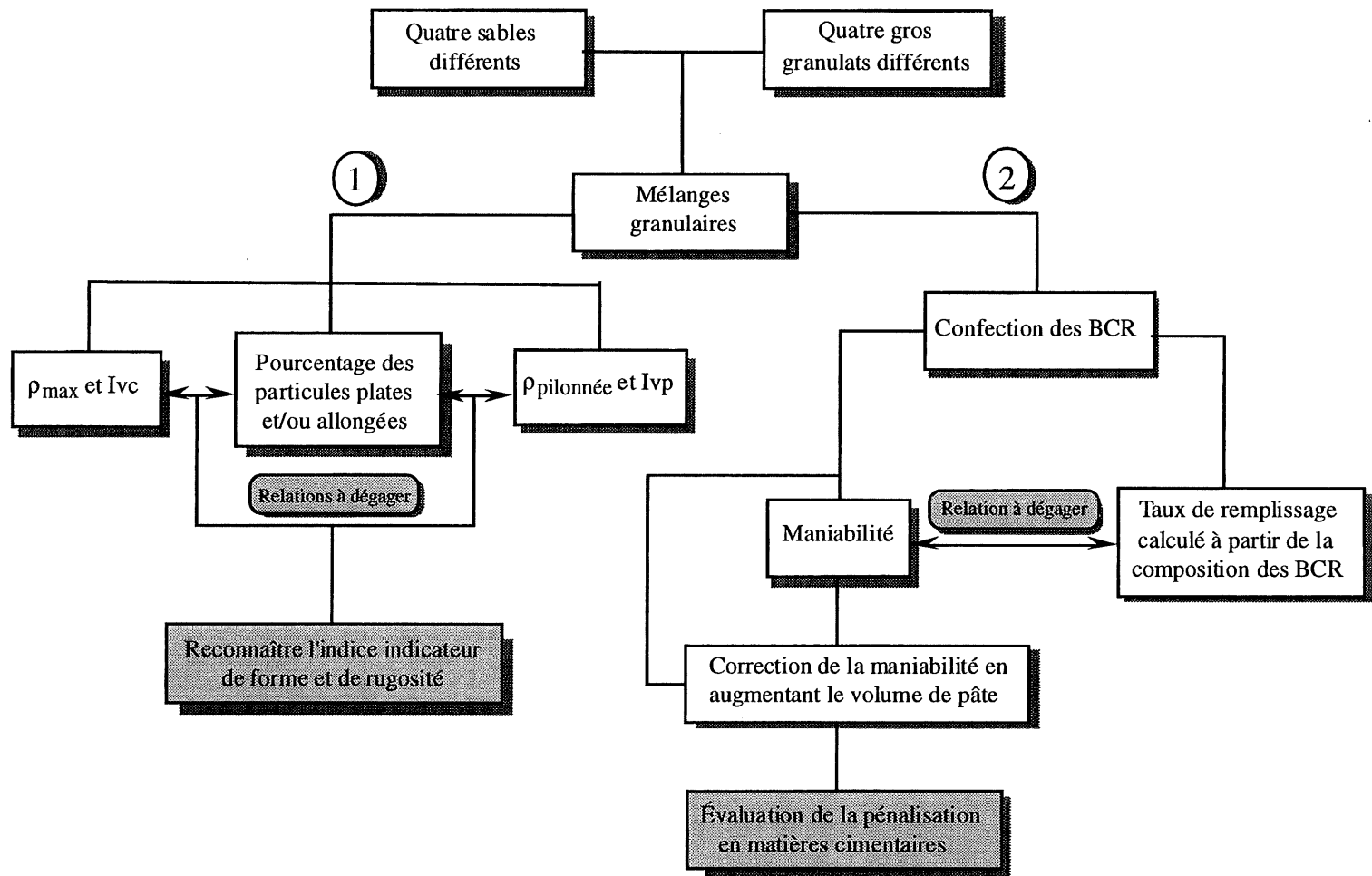


Figure 4.1: Organigramme du projet de recherche.

CHAPITRE 5

MATÉRIAUX ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

5.1 MATÉRIAUX UTILISÉS

5.1.1 Ciment

Tout au long de nos expériences, nous avons utilisé le ciment type 20M à faible teneur en alcalis provenant de la cimenterie de Saint-Constant. Le type 20M à faible teneur en alcalis est préféré dans les constructions massives afin de minimiser le dégagement thermique.

La composition de Bogue et l'analyse chimique du ciment utilisé sont présentées dans les Tableaux 5.1 et 5.2.

Tableau 5.1: Composition de Bogue du ciment utilisé.

Constituant	Proportion (%)
C ₃ A	1,3 %
C ₃ S	32 %
C ₂ S	43 %
C ₄ AF	15 %

5.1.2 Cendres volantes

La cendre volante est un sous-produit de la combustion du charbon pulvérisé utilisé dans les centrales thermiques. La cendre volante classe F utilisée provenait de Great Lakes Canada. Elle est formée de sphères dont 85% passent à travers le tamis 45 µm. Son indice pouzzolanique à 28 jours avec le ciment vaut 88%. Le rôle de la cendre volante est d'améliorer la maniabilité du mélange (la forme des particules est parfaitement sphérique), de limiter le dégagement thermique sans, toutefois, freiner le gain de résistance (indice de pouzzolanité élevé).

La composition chimique et les caractéristiques physiques de la cendre volante classe F utilisée sont données au Tableau 5.2.

Tableau 5.2: Caractéristiques physico-chimiques du ciment type 20M et de la cendre volante.

Élément	Ciment type 20M	Cendre volante
SiO ₂	23,7 %	50,0 %
Al ₂ O ₃	3,6 %	29,4 %
Fe ₂ O ₃	4,9 %	15,3 %
CaO	61,5 %	1,7 %
MgO	2,5 %	0,7 %
SO ₃	2,3 %	---
Na ₂ O équivalent	0,53 %	0,4 %
Densité	3,15	2,44
Finesse: passant 45 µm	89,8 %	78 %
Perte au feu	0,5 %	2,2 %
Blaine	327 m ² /kg	---

5.1.3 Eau de gâchage

L'eau de l'aqueduc municipal de la ville de Sherbrooke a été utilisée à la température ambiante du laboratoire (18°C).

5.1.4 Agent réducteur d'eau

L'agent réducteur d'eau utilisé lors du gâchage de nos bétons était le WRDA-82 qui est une solution aqueuse de lignosulfonates modifiés, contenant un catalyseur qui favorise une meilleure hydratation du ciment Portland. Il est conforme à la norme CSA A266.2-M78 comme type WN et comme type SN et à la norme ASTM C494 comme type A.

5.1.5 Granulats fins

Quatre types de granulats fins, tous conformes à la norme CSA A23.1-M77, ont été utilisés pour la fabrication des BCR. Le Tableau 5.3 illustre la nature et l'origine de chacun de ces granulats fins.

Tableau 5.3: Natures et origines des différents granulats fins utilisés.

Codification	Nature	Origine
SAC	Sable naturel siliceux dont les particules ont une forme plutôt arrondie et une surface relativement lisse.	Sherbrooke
SP	Sable manufacturé, à base de syénite, à partir d'un résidu de concassage. Les particules ont une forme irrégulière et une surface rugueuse.	Montréal (St-Hilaire)
SLR	Criblure de pierre granitique provenant des piles de réserve du projet du Lac Robertson. Les particules ont une forme très anguleuse et une surface très rugueuse.	Site d'aménagement du Lac Robertson (Basse Côte-Nord)
SLG	Sable manufacturé, à base d'un gneiss granitique, riche en particules passant le tamis 80 μm dont la forme et la rugosité sont respectivement anguleuse et rugueuse.	Montréal (New Glasgow)

La distribution granulométrique des granulats fins est présentée dans la Figure 5.1. Leurs caractéristiques physiques sont présentées dans le Tableau 5.4.

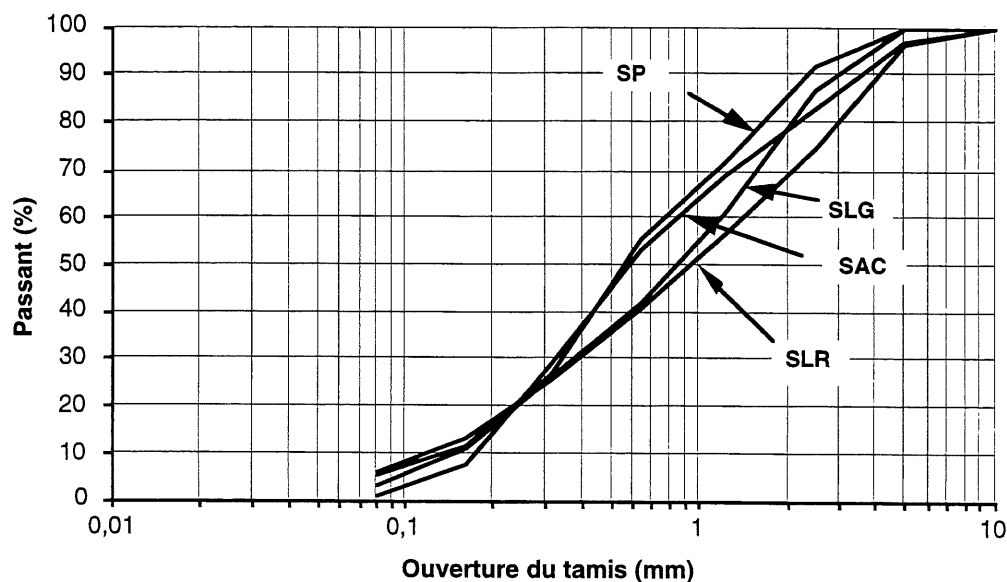


Figure 5.1: Courbes granulométriques des 4 types de sables utilisés dans cette étude.

Tableau 5.4: Caractéristiques physiques des sables.

	SAC	SP	SLR	SLG
densité d _{ss}	2,66	2,68	2,80	2,68
absorption (%)	1,32	0,37	0,27	0,62
module de finesse	2,7	2,4	2,9	2,7

5.1.6 Gros granulats

Nous avons utilisé 4 gros granulats dont les roches mères respectives proviennent toutes de carrières de roches massives. Leurs caractéristiques physiques et géométriques (rugosité de surface et forme des particules) sont différentes à cause de la différence des systèmes de concassage qui ont servi à leurs productions:

- P Ce granulat est produit par la carrière Poudrette à partir d'une syénite potentiellement réactive (RAG). Le système de concassage comporte un concasseur primaire à mâchoires et deux concasseurs giratoires (secondaire et tertiaire). Un concasseur à impact est utilisé comme concasseur correcteur de forme; ce qui permet l'obtention d'un granulat cubique comportant une très faible proportion de particules plates ou allongées (Figure 5.2). Le débit horaire de production est d'environ 400 t/h.
- LR Ce granulat a été produit sur le site d'aménagement du Lac Robertson à partir d'un gneiss granitique. Le système de concassage comportait un concasseur primaire à mâchoires et deux concasseurs coniques secondaire et tertiaire. Le débit horaire très élevé (environ 450 t/h) a occasionné la production d'un granulat très anguleux et contenant une proportion élevée de particules plates et/ou allongées (Figure 5.3).
- LGC Ce granulat est produit par Sables-LG, dans la région de Montréal, à partir d'un gneiss granitique. Le système de concassage comporte un concasseur primaire à mâchoires et deux concasseurs coniques secondaire et tertiaire. Le débit horaire de production est 400 t/h. Le granulat produit est anguleux et renferme une proportion assez élevée de particules plates et/ou allongées (Figure 5.4).
- LGR Ce granulat est aussi produit par Sables-LG. Le seul traitement qu'il subit est un lavage combiné avec le tamisage. C'est un granulat granitique fluvioglaciaire riche en particules assez cubiques et à texture lisse (Figure 5.5).

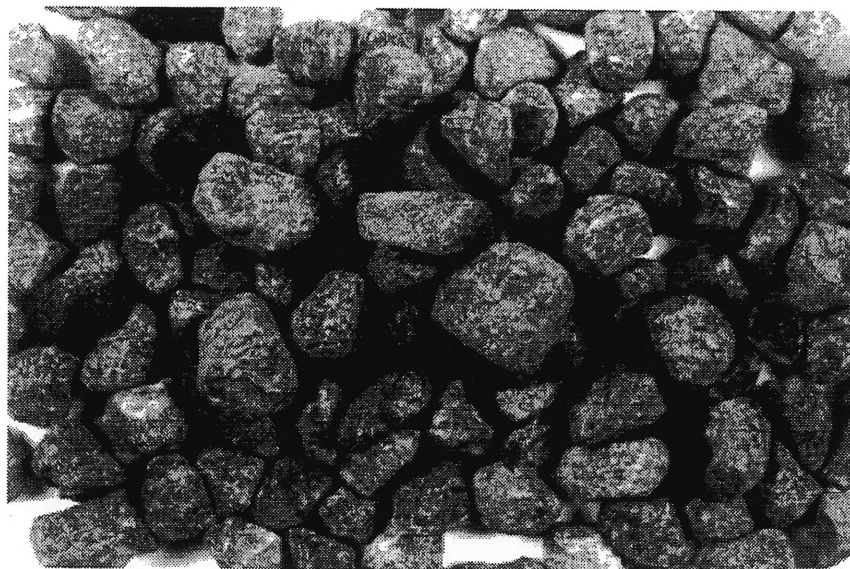


Figure 5.2: Forme et rugosité typiques des particules du gros granulat P.



Figure 5.3: Forme et rugosité typiques des particules du gros granulat du projet du Lac Robertson LR.



Figure 5.4: Forme et rugosité typiques des particules du gros granulat LGC.

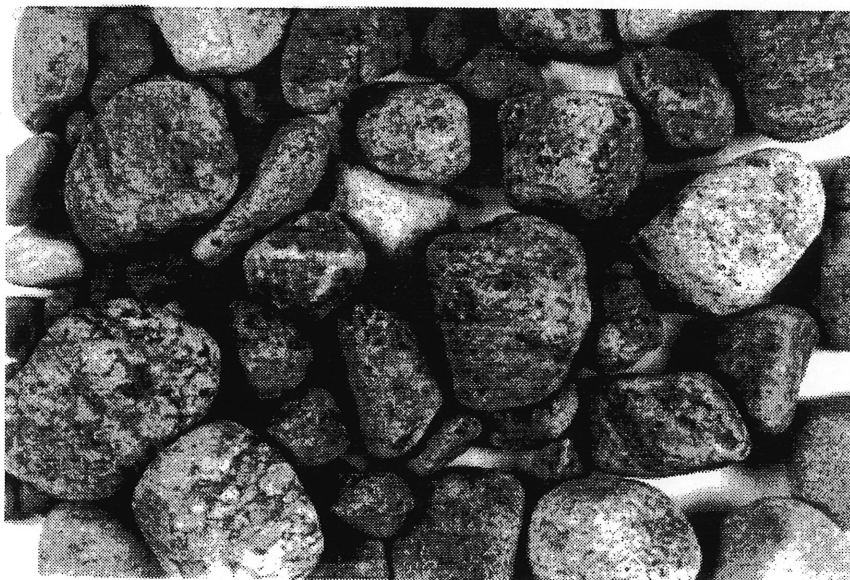


Figure 5.5: Forme et rugosité typiques des particules du gros granulat naturel (roulé) LGR.

La distribution granulométrique du gros granulat est constante pour tous les types d'essais car elle a toujours été reconstituée après le tamisage des granulats. Les caractéristiques physiques de tous les gros granulats sont données par le Tableau 5.5.

Tableau 5.5: Caractéristiques physiques des gros granulats.

	P	LR	LGC	LGR
densité d _{ss}	2,72	2,84	2,76	2,76
absorption (%)	0,30	0,30	0,37	0,37

5.1.7 Mélanges granulaires complets

Dès le début de notre étude expérimentale, nous avons voulu reproduire une granulométrie fixée, recommandée par l'ACI pour les BCR, en combinant les granulats fins avec les gros granulats. Pour ce faire, les sables ont été utilisés tels qu'ils sont; alors que tous les gros granulats ont été tamisés et séparés en tranches. Après cette opération, on combinait les tranches granulaires dans des proportions précises afin de s'approcher le plus possible de la granulométrie fixée au départ (Figure 5.6). Cette façon nous a permis de maîtriser la granulométrie des mélanges et de ne pas en tenir compte, dans l'analyse des résultats, comme un paramètre de plus.

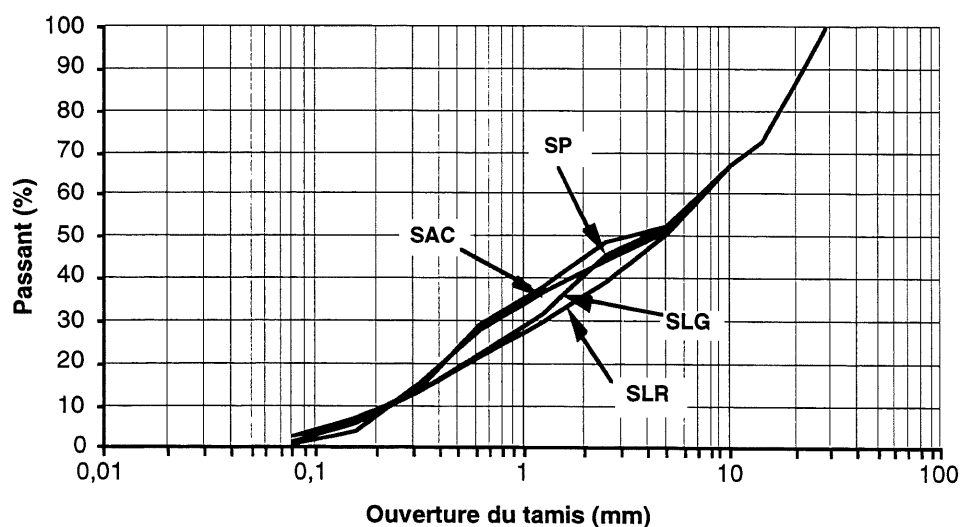


Figure 5.6: Variation de la granulométrie du mélange granulaire complet en fonction des 4 types de sables utilisés dans cette étude.

5.2 PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

Toutes les manipulations effectuées au laboratoire sur les granulats ainsi que les essais sur le béton frais et durci sont conformes aux spécifications des normes correspondantes. Les essais utilisés sur granulats et BCR sont:

5.2.1 Détermination du pourcentage de particules plates et allongées des granulats selon NQ 2560-265/1986-07-07

L'essai pour déterminer le pourcentage de particules plates et allongées s'applique aux gros granulats dont les particules ont 5 mm et plus de diamètre. À partir d'un échantillon représentatif de 200 particules et plus, on détermine les particules plates et allongées à l'aide des jauges d'aplatissement et d'allongement (Voir Figures 2.9 et 2.10). Le rapport entre la masse des particules plates (respectivement allongées) et la masse de l'échantillon initial représente le pourcentage des particules plates (respectivement allongées).

5.2.2 Détermination des masses volumiques minimale et maximale des granulats selon NQ 2560-060/83

L'essai à la table vibrante, permettant de déterminer les masses volumiques minimale et maximale, a été appliqué à toutes les tranches granulaires, y compris les sables, et aux mélanges continus (0-28 mm). Le principe de l'essai consiste à déverser le granulat, avec une grande cuillère de laboratoire, et à le densifier pendant 8 minutes par vibration dans un moule cylindrique, dont la capacité est 2830 cm³. La densification du granulat par vibration est accompagnée d'un compactage énergétique sous l'effet du poids d'une surcharge ($25,9 \pm 0,2$ kg) guidée par un manchon guide. La masse volumique minimale est calculée à partir de la masse de l'échantillon et du volume du moule. Après 8 minutes de densification, le granulat se tasse et occupe un volume inférieur au volume initial. Ce volume est déterminé à partir de la lecture du comparateur. La connaissance de ce volume et de la masse de l'échantillon permet de calculer la masse volumique maximale du granulat. Cette grandeur est intéressante dans la mesure où elle permet de calculer le volume des vides du granulat après compactage (V_{vc}). Ce volume donne une bonne idée, comme on va le voir au chapitre 6, sur le volume de pâte qu'il faut incorporer avec les granulats pour atteindre une maniabilité donnée du BCR.

5.2.3 Détermination de la masse volumique pilonnée des granulats selon NQ 2560-060/83

Nous avons déterminé la masse volumique du granulat pilonné ($\rho_{pil.}$) selon la norme NQ 2560-060/83. Cet essai consiste à remplir un contenant, de capacité 15 L, avec du granulat en trois

couches. Chacune des couches est pilonnée de 25 coups de pilon, répartis également sur la surface. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle aboutit au calcul du volume des vides du granulat pilonné; le volume du granulat dans un tel état ne peut simuler le volume occupé par le granulat, dans le BCR, compacté énergétiquement. Cette méthode peut, néanmoins, être appliquée dans le cas des bétons traditionnels vu que le granulat dans ce type de béton n'est pas très sollicité lors de la mise en place.

5.2.4 Détermination de la maniabilité et de la masse volumique du BCR selon ASTM C1170-91

La maniabilité du BCR est une propriété importante puisqu'elle traduit la facilité de sa mise en place et d'une meilleure consolidation. Elle est mesurée à l'aide d'un appareil de type Vebe modifié. Cet appareil consiste en un moule cylindrique qui surmonte une table vibrante. Après avoir placé une masse de $(13.4 \pm 0.7 \text{ kg})$ de BCR dans le moule, on place une surcharge ($22.7 \pm 0.5 \text{ kg}$) au-dessus de notre échantillon et on vibre l'ensemble. Le test consiste à mesurer le temps VC (temps Vebe) requis pour la formation d'un anneau de pâte (remontée de pâte) au pourtour de la plaque de plexiglas (Figure 5.7).

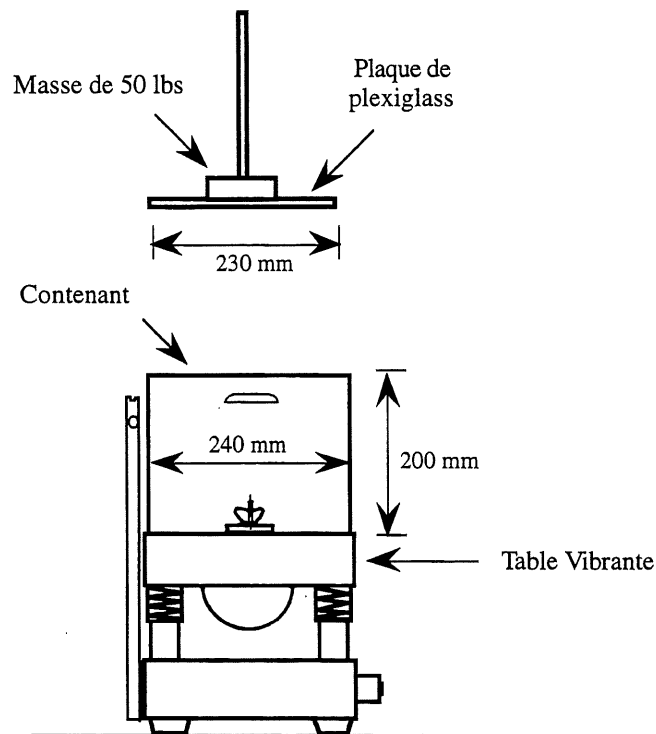


Figure 5.7: Le principe de fonctionnement d'un appareil Vebe modifié.

5.2.5 Détermination de la perméabilité à l'eau du BCR à 91d

La mesure de la perméabilité du BCR est une mesure relativement délicate et longue. Le perméabilimètre qui a été utilisé peut accommoder des échantillons de BCR de 150×300 mm. Ces échantillons n'ont qu'à subir une préparation très sommaire.

Les opérations à effectuer sont le perçage d'un trou au centre de l'échantillon; ce trou traverse l'échantillon de BCR de part en part, selon l'axe du cylindre et l'aplanissement des deux extrémités.

L'essai consiste à soumettre l'échantillon de BCR à un écoulement radial convergent sous six paliers de pressions consécutifs et à enregistrer le débit d'eau une fois qu'il est stabilisé (Voir Figure 5.8).

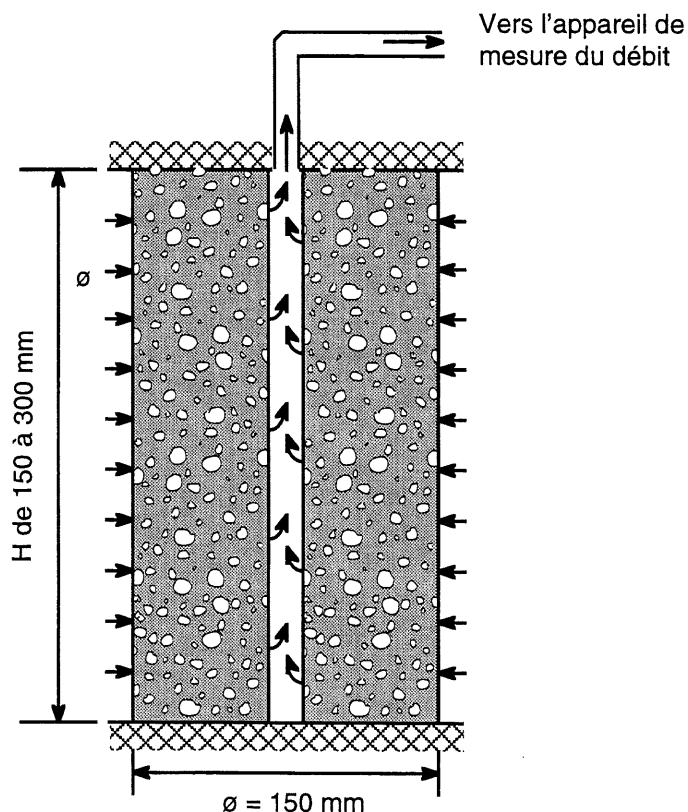


Figure 5.8: Principe de mesure de la perméabilité à l'eau.

La valeur de K est ensuite calculée en appliquant la formule suivante dérivée de la formule des puits:

$$K = \frac{Q \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)}{2 \pi L_{\text{eff}} \Delta P}$$

où Q = débit mesuré pour un différentiel de pression;
 D_2 = diamètre extérieur de l'échantillon;
 D_1 = diamètre intérieur du trou central;
 L_{eff} = hauteur effective sur laquelle on suit l'écoulement.

La détermination de la perméabilité à l'eau du BCR a été réalisée selon la procédure mise au point par PERRATON à l'Université de Sherbrooke [27].

5.2.6 Détermination de la résistance à la compression simple du BCR

La résistance à la compression (f'_c) du BCR a été déterminée à 28d et 91d sur une presse hydraulique "Tinius Olsen" d'une capacité de 400 000 lbs (180 000 kg). Le taux de chargement était maintenu à 0,3 MPa par seconde. L'essai a été effectué conformément à la norme CSA A23.2-9C. Le Tableau 5.6 illustre le nombre de cylindres utilisés pour la détermination de f'_c .

5.2.7 Détermination du module d'élasticité statique (E'_c) du BCR

Le module d'élasticité statique à 91d est évalué en effectuant le cycle de chargement-déchargement à 40% de la charge de rupture du BCR. Les 40% de la charge de rupture sont utilisés de façon à éviter la création de fissures dans le matériau soumis à l'essai.

La détermination du module d'élasticité statique a été réalisée selon la norme ASTM C469-65, sur deux cylindres 150 × 300 mm en utilisant une presse hydraulique MTS (Material Testing Standard), avec un taux de chargement constant correspondant à 0,3 MPa/s.

5.2.8 Coiffage des éprouvettes

Pour obtenir une répartition uniforme des contraintes sur le cylindre lors du chargement, il faut s'assurer de la planéité des surfaces ainsi que de leur orthogonalité par rapport aux génératrices du cylindre. Pour tester les cylindres à 28d et 91d, on a utilisé un matériau de coiffe à base de soufre maintenu à une température de 130°C.

5.2.9 Procédure de malaxage pour la confection du BCR

La procédure de malaxage utilisée pour la confection de 150 kg de BCR est présentée à la Figure 5.7. Les granulats (fins et gros) ont été mélangés humides. La teneur en eau de ces

granulats a été prise en compte dans le calcul du mélange. Le malaxage des BCR a été effectué à l'aide d'un malaxeur à cuve horizontale tournante d'une capacité d'environ 100 litres.

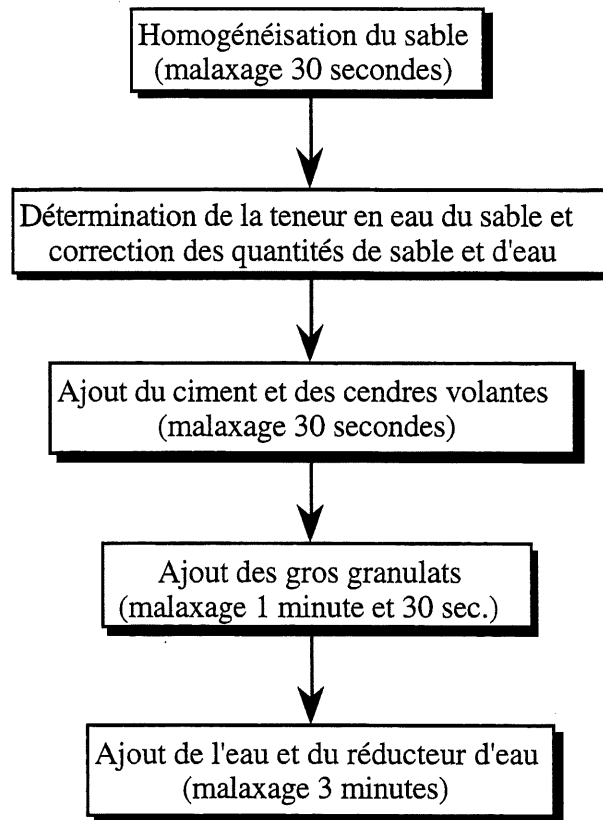


Figure 5.9: Procédure de malaxage utilisée pour la confection des BCR.

5.2.10 Fabrication des éprouvettes d'essai selon ASTM C1176-91

Des moules en plastique (PVC) minces, de forme cylindrique, d'élancement 2, et légèrement enduits d'huile, ont été utilisés pour recevoir le BCR frais. Ces moules en plastique (150 × 300 mm) sont glissés à l'intérieur d'un moule en acier pour éviter qu'ils ne s'éventrent sous l'effet du compactage. Chaque échantillon est compacté en trois couches, d'épaisseur 100 mm, par un marteau vibrant (Kango 637) dont l'amplitude et la fréquence sont normalisées. Le compactage de chaque couche se termine au moment où un anneau de pâte se forme au pourtour de la surface du marteau vibrant. Les échantillons sont ensuite démoulés après trois jours et sont immergés dans de l'eau saturée en chaux à une température constante (18°C) pour permettre un meilleur mûrissement. Le nombre d'échantillons et le format des moules sont présentés dans le Tableau 5.6.

Tableau 5.6: Programme d'essais sur les échantillons de béton durci.

Essai	Nombre d'échantillons	
Compression simple	28d	3
	91d	2
Module d'élasticité statique	91d	2
Perméabilité à l'eau	91d	2

CHAPITRE 6

PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

6.1 CARACTÉRISTIQUES DES MÉLANGES GRANULAIRES

6.1.1 Tranches granulométriques

Pour chaque fraction grossière (5-10, 10-14, 14-20, 20-28 mm), on a déterminé le pourcentage de particules plates, le pourcentage de particules allongées et le pourcentage de particules plates et allongées; les masses volumiques maximale, minimale et pilonnée ainsi que les indices des vides intergranulaire du granulat pilonné et compacté (respectivement Ivp et Ivc). Pour les granulats fins, seuls les masses volumiques maximale, minimale, pilonnée et les indices des vides Ivp et Ivc ont été déterminés. Les résultats sont présentés dans les Tableaux 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 et 6.5.

Tableau 6.1: Teneur en particules plates et/ou allongées, masses volumiques et indices des vides Ivp et Ivc des gros granulats (fraction 5-10 mm).

	P	LR	LGC	LGR
% plates	7,6	17,8	10,4	5,9
% allongées	16,2	59,9	51,1	23,9
% plates et allongées	0,4	7,1	3,1	2,4
ρ_{\min} (kg/m ³)	1525	1400	1395	1530
ρ_{\max} (kg/m ³)	1700	1640	1625	1715
$\rho_{\text{pilonnée}}$ (kg/m ³)	1645	1515	1495	1660
Ivp (%)	39,5	46,6	45,8	39,8
Ivc (%)	37,5	42,2	41,1	37,9

Tableau 6.2: Teneur en particules plates et/ou allongées, masses volumiques et indices des vides Ivp et Ivc des gros granulats (fraction 10-14 mm).

	P	LR	LGC	LGR
% plates	1	16,5	13,2	2,7
% allongées	7,5	37,4	15,9	33,1
% plates et allongées	0,3	5,6	1,7	1,1
ρ_{\min} (kg/m ³)	1550	1405	1395	1550
ρ_{\max} (kg/m ³)	1725	1640	1620	1735
$\rho_{\text{pilonnée}}$ (kg/m ³)	1655	1560	1490	1660
Ivp (%)	43	45,1	46	39,9
Ivc (%)	36,6	42,3	41,3	37,1

Tableau 6.3: Teneur en particules plates et/ou allongées, masses volumiques et indices des vides Ivp et Ivc des gros granulats (fraction 14-20 mm).

	P	LR	LGC	LGR
% plates	1	11,9	17,0	6,6
% allongées	1,6	34,9	42,3	13,3
% plates et allongées	0	4,4	5,8	0,5
ρ_{\min} (kg/m ³)	1540	1435	1395	1530
ρ_{\max} (kg/m ³)	1710	1660	1630	1715
$\rho_{\text{pilonnée}}$ (kg/m ³)	1645	1580	1520	1665
Ivp (%)	39,5	44,4	44,9	39,7
Ivc (%)	37,1	41,5	40,9	37,9

Tableau 6.4: Teneur en particules plates et/ou allongées, masses volumiques et indices des vides Ivp et Ivc des gros granulats (fraction 20-28 mm).

	P	LR	LGC	LGR
% plates	0	10,5	3,1	0
% allongées	53,9	22,2	13,8	53,9
% plates et allongées	0	0	0,5	0
ρ_{\min} (kg/m ³)	1540	1420	1440	1540
ρ_{\max} (kg/m ³)	1730	1645	1665	1730
$\rho_{\text{pilonnée}}$ (kg/m ³)	1630	1550	1550	1630
Ivp (%)	40,1	45,4	43,8	40,9
Ivc (%)	36,4	42,1	39,7	37,3

Tableau 6.5: Masses volumiques et indices des vides Ivp et Ivc des sables.

	SAC	SP	SLR	SLG
ρ_{\min} (kg/m ³)	1480	1505	1475	1460
ρ_{\max} (kg/m ³)	1760	1750	1660	1775
$\rho_{\text{pilonnée}}$ (kg/m ³)	1625	1610	1590	1605
Ivp (%)	39,0	40,0	43,2	40,1
Ivc (%)	33,8	34,7	40,7	34,7

À la lumière de ces résultats, on a tracé les relations entre les indices des vides et le pourcentage de particules plates, le pourcentage de particules allongées et le pourcentage de particules plates et allongées. Les indices des vides du granulat pilonné et compacté ont été déterminés à partir de la densité de la roche et respectivement de la masse volumique pilonnée et de la masse volumique maximale du granulat.

- Effet du pourcentage des particules plates et/ou allongées sur Ivp

Les Figures 6.1, 6.2 et 6.3 montrent que la forme des granulats influence significativement la compacité de chacune des tranches granulaires. L'indice des vides Ivp du granulat augmente à peu près linéairement avec la proportion de particules plates, allongées ou plates et allongées. En comparant les pentes des relations entre l'indice des vides et le pourcentage de particules plates ou allongées, on trouve que l'indice des vides est surtout influencé par la proportion des particules plates. L'indice des vides des tranches granulaires comportant une forte proportion de particules plates et allongées est d'environ 15% supérieur à celui d'un granulat ne comportant que des particules cubiques.

- Effet du pourcentage des particules plates et/ou allongées sur Ivc

Les Figures 6.4, 6.5 et 6.6 montrent que l'indice des vides Ivc du granulat, tout comme Ivp, augmente linéairement avec la proportion de particules plates, allongées ou plates et allongées. De la même façon, si on compare les pentes des relations entre l'indice des vides et le pourcentage de particules plates ou allongées, on trouve que l'indice des vides est surtout influencé par la teneur en particules plates.

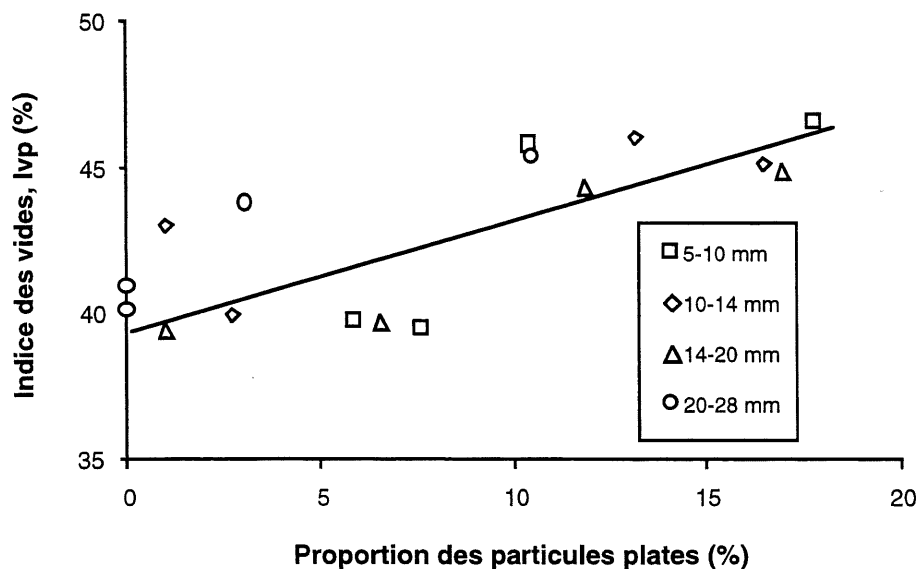


Figure 6.1: Influence de la teneur en particules plates sur l'indice des vides Ivp de chacune des tranches granulométriques.

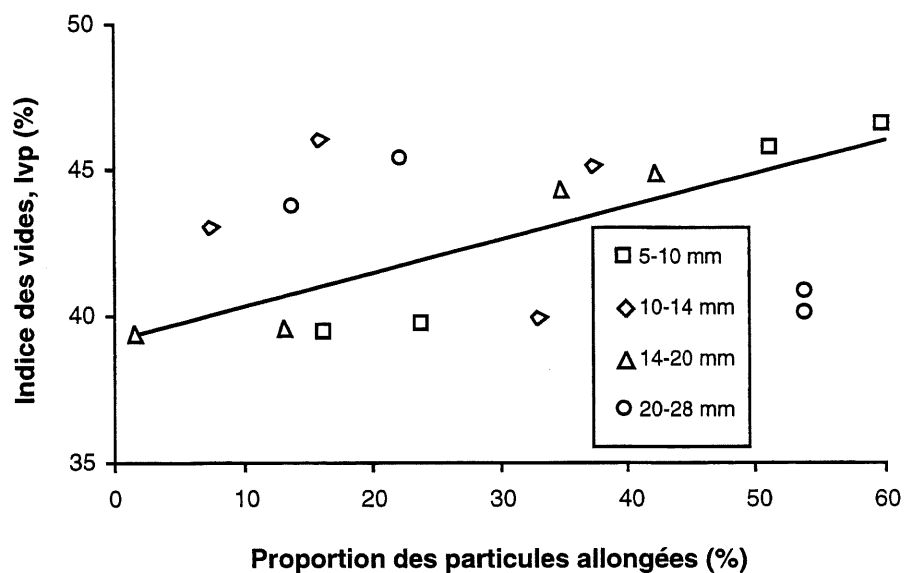


Figure 6.2: Influence de la teneur en particules allongées sur l'indice des vides Ivp de chacune des tranches granulométriques.

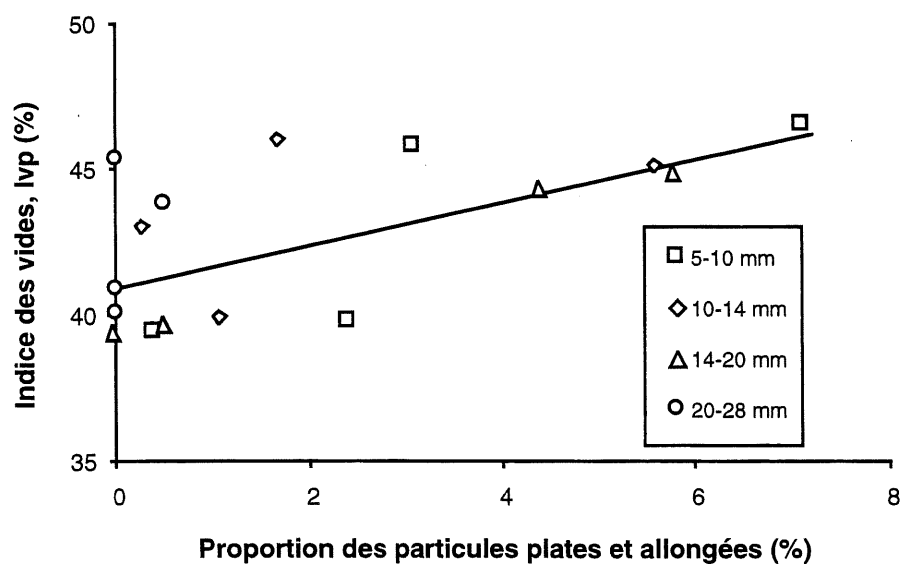


Figure 6.3: Influence de la teneur en particules plates et allongées sur l'indice des vides Ivp de chacune des tranches granulométriques.

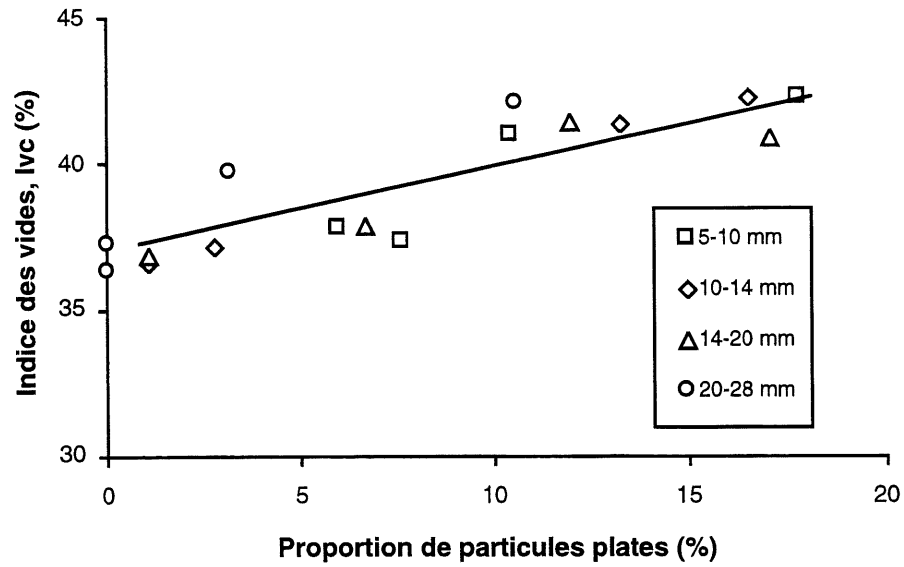


Figure 6.4: Influence de la teneur en particules plates sur l'indice des vides I_{vc} de chacune des tranches granulométriques.

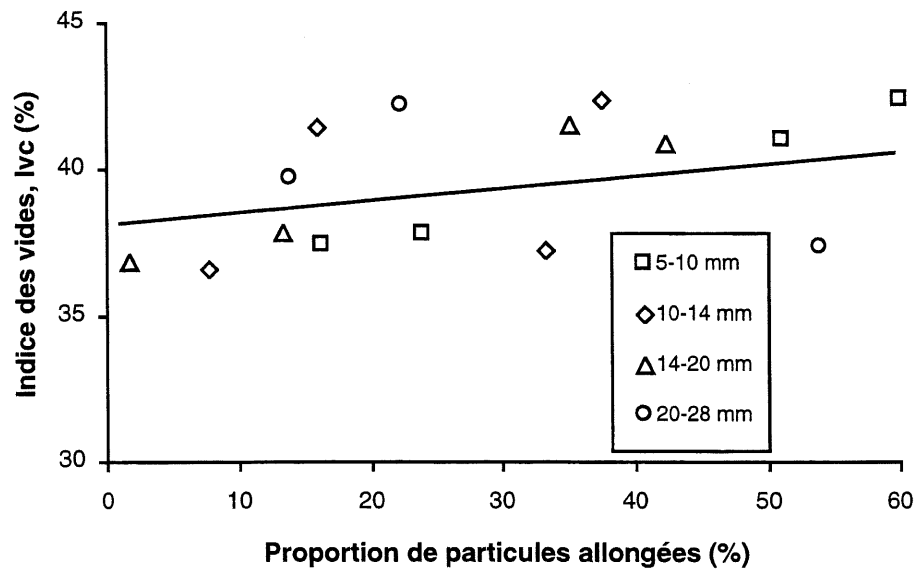


Figure 6.5: Influence de la teneur en particules allongées sur l'indice des vides I_{vc} de chacune des tranches granulométriques.

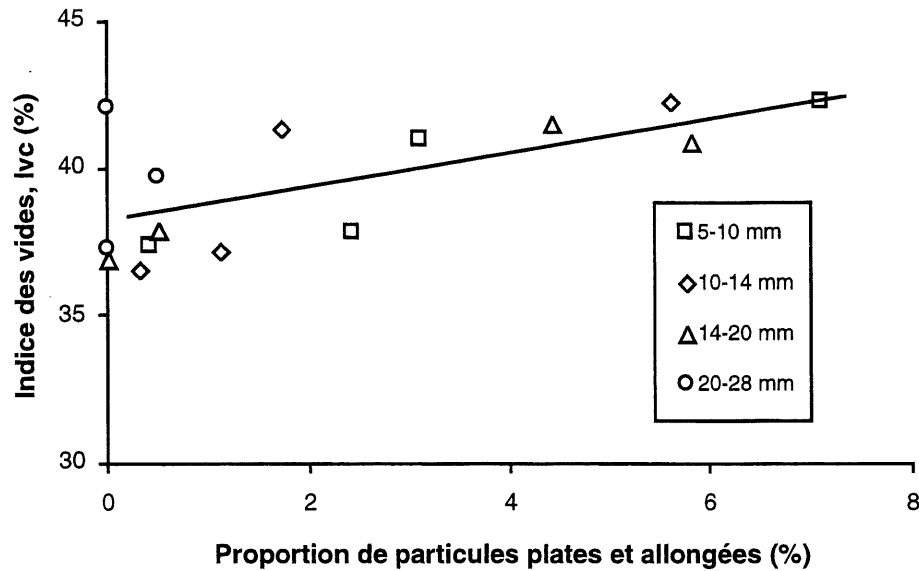


Figure 6.6: Influence de la teneur en particules plates et allongées sur l'indice des vides I_{vc} de chacune des tranches granulométriques.

Suite à ces constatations, on peut conclure que les indices des vides I_{vp} et I_{vc} sont des paramètres qui tiennent compte de la forme des particules d'un granulat lors de la mesure de son vide intergranulaire. Cependant, on peut se poser la question suivante: lequel parmi ces deux indices est celui qui tient mieux compte de la forme du granulat ?

Pour répondre à cette question, il nous suffit de comparer entre la dispersion des nuages de points sur les Figures 6.1, 6.2 et 6.3 (relatives à I_{vp}) et celle des nuages de points sur les Figures 6.4, 6.5 et 6.6 (relatives à I_{vc}) pour déduire facilement que I_{vc} est plus précis et plus sensible que I_{vp} .

En conséquence, nous avons choisi de travailler avec I_{vc} . Toutefois, il est à noter qu'on parlera plutôt de V_{vc} (volume des vides du granulat compacté) qui est fonction de I_{vc} .

6.1.2 Mélanges granulaires complets (0-28 mm)

L'étude expérimentale s'est faite sur des mélanges granulaires ayant tous une granulométrie très voisine mais qui diffèrent de par la forme ou la rugosité de leurs particules. Le Tableau 6.6 décrit sommairement les principales caractéristiques des six mélanges granulaires utilisés dans le cadre de cette étude.

Pour chacun des six mélanges granulaires présentés au Tableau 6.6, on a déterminé les masses volumiques minimale (ρ_{\min}) et maximale (ρ_{\max}) et la masse volumique pilonnée ($\rho_{\text{pilonnée}}$). La masse volumique maximale a été utilisée pour calculer l'indice des vides I_{vc} du mélange granulaire à partir des densités des roches et des proportions de chacune des tranches granulaires.

Connaissant l'indice des vides I_{vc} , on peut ensuite calculer le volume des vides de compactage (V_{vc}) dans un mètre cube de granulats compacté à sa masse volumique maximale. Le volume des vides de compactage correspond approximativement au volume de pâte (eau+matières cimentaires) qui devrait être ajouté au mélange granulaire pour fabriquer le BCR selon l'approche béton. Les résultats des mesures et des calculs sont présentés au Tableau 6.7.

Tableau 6.6: Caractéristiques des particules des mélanges granulaires.

Mélange	Fraction grossière (> 5 mm)	Fraction fine (< 5 mm)
P-SAC	Granulat concassé Forme cubique et surface rugueuse	Sable naturel Forme arrondie et surface lisse
P-SP	Granulat concassé Forme cubique et surface rugueuse	Sable manufacturé Forme anguleuse et surface rugueuse
LGR-SAC	Granulat naturel Forme cubique et surface lisse	Sable naturel Forme arrondie et surface lisse .
LGR-SLG	Granulat naturel Forme cubique et surface lisse	Sable manufacturé Forme anguleuse et surface rugueuse
LGC-SLG	Granulat concassé Particules plates et allongées et surface rugueuse	Sable manufacturé Forme anguleuse et surface rugueuse
LR-SLR	Granulat concassé Riche en particules plates et allongées et surface rugueuse	Sable manufacturé Forme anguleuse et surface rugueuse

Globalement, les résultats du Tableau 6.7 montrent que, pour une courbe granulométrique donnée, les mélanges granulaires possédant une plus grande proportion de particules plates et/ou allongées ont un indice des vides intergranulaire plus élevé.

L'indice des vides est minimal lorsque le mélange granulaire est constitué d'un sable naturel et d'un gros granulat principalement constitué de particules cubiques ou arrondies.

Ces résultats montrent que la forme et la rugosité des particules sont des variables qui doivent être prises en compte lors du processus de sélection des granulats et de formulation du BCR, car elles ont une influence très nette sur l'indice des vides du mélange granulaire et, par conséquent, sur la proportion d'eau et de particules fines à utiliser pour combler ces vides (le volume de pâte). L'effet est significatif puisque l'indice des vides passe de 28% (LR-SLR) à 20% (P-SAC) en optimisant la forme et la rugosité des particules. Le volume des vides de compactage passe alors de 218 L/m³ à 166 L/m³. Le volume de pâte nécessaire pour combler les vides de compactage est par conséquent 23% plus faible dans le cas d'un mélange granulaire comportant un sable naturel et un gros granulat constitué de particules cubiques.

Tableau 6.7: Masses volumiques, indice des vides et volume des vides de compactage des mélanges granulaires.

Gros Granulat Sable	P SAC	LGR SAC	P SP	LGR SLG	LGC SLG	LR SLR
% plates	2,8	4,0	2,8	4,0	10,6	13,8
% allongées	21,3	30,2	21,3	30,2	33,6	39,1
% plates et allongées	0,2	1,1	0,2	1,1	3,0	4,1
pmin (kg/m ³)	2055	2030	2015	2025	1995	2000
pmax (kg/m ³)	2235	2215	2200	2225	2190	2205
ppilonnée (kg/m ³)	2095	2105	2140	2095	2085	2095
Ivc (%)	20	20	22	23	27	28
Vvc (L/m ³)	166	181	184	188	200	218

Ces résultats suggèrent que la quantité de liant nécessaire pour obtenir un BCR de consistance donnée pourrait donc être significativement réduite en optimisant la forme des particules du mélange granulaire.

6.2 CARACTÉRISTIQUES DES BCR CONFECTIONNÉS

6.2.1 Influence de la forme et de la rugosité des particules sur la maniabilité

Les six mélanges granulaires présentés au Tableau 6.7 ont été utilisés pour fabriquer des BCR. Tous les bétons ont été fabriqués avec un ciment type 20M à faible teneur en alcalis, une cendre volante de classe F et un agent réducteur d'eau.

Les BCR ont généralement une formulation voisine de celle utilisée pour la construction du barrage du Lac Robertson (170 kg/m³ de liant et 120 kg/m³ d'eau). La formulation et les principales caractéristiques des BCR produits sont présentées au Tableau 6.8. La proportion totale de liant (ciment + CV) est généralement comprise entre 172 et 180 kg/m³, sauf dans les cas des mélanges LGC-SLG+5%, LGC-SLG+10% et LR-SLR+15% pour lesquels le volume de pâte (eau+ciment+CV) a été augmenté de 5%, 10% et 15% respectivement. Les résistances à la compression à 91 jours de tous ces BCR sont comprises entre 22 MPa et 25 MPa.

Tableau 6.8: Caractéristiques des mélanges et propriétés des BCR.

BCR	Ciment	CV	Eau (kg/m ³)	Sable	G.G.	Red. d'eau (ml/m ³)	VC (s)	Mvol (kg/m ³)	VP (L/m ³)	$\frac{VP}{V_{vc}}$ (%)
P-SAC	86,1	86,1	112	1147	1018	481	11	2432	174	105
LGR-SAC	86,0	86,0	111	1144	1016	480	13	2427	173	104
P-SP	86,6	86,6	112	1153	1023	484	15	2445	175	95
LGR-SLG	87,3	87,3	113	1164	1033	488	17	2467	176	94
LGC-SLG	87,0	87,0	113	1160	1029	486	18	2457	176	90
LGC-SLG+5%	90,5	90,5	117	1147	1018	481	15	2431	183	100
LGC-SLG+10%	93,8	93,8	121	1136	1008	477	12	2408	193	104
LR-SLR	90,2	90,2	117	1203	1067	485	23	2548	182	83
LR-SLR+15%	98,7	98,7	128	1143	1015	480	14	2423	200	101

La Figure 6.7 montre que la maniabilité du BCR est essentiellement fonction du taux de remplissage des vides de compactage du mélange granulaire (le rapport entre le volume de pâte dans le BCR et le volume des vides de compactage du mélange granulaire: VP/V_{vc}). Pour augmenter la maniabilité d'un BCR, on peut donc soit augmenter le volume de pâte, soit, au contraire, diminuer le volume des vides du mélange granulaire. On peut diminuer le volume des vides du mélange granulaire en jouant sur la courbe granulométrique ou encore, en optimisant la forme et la rugosité des particules.

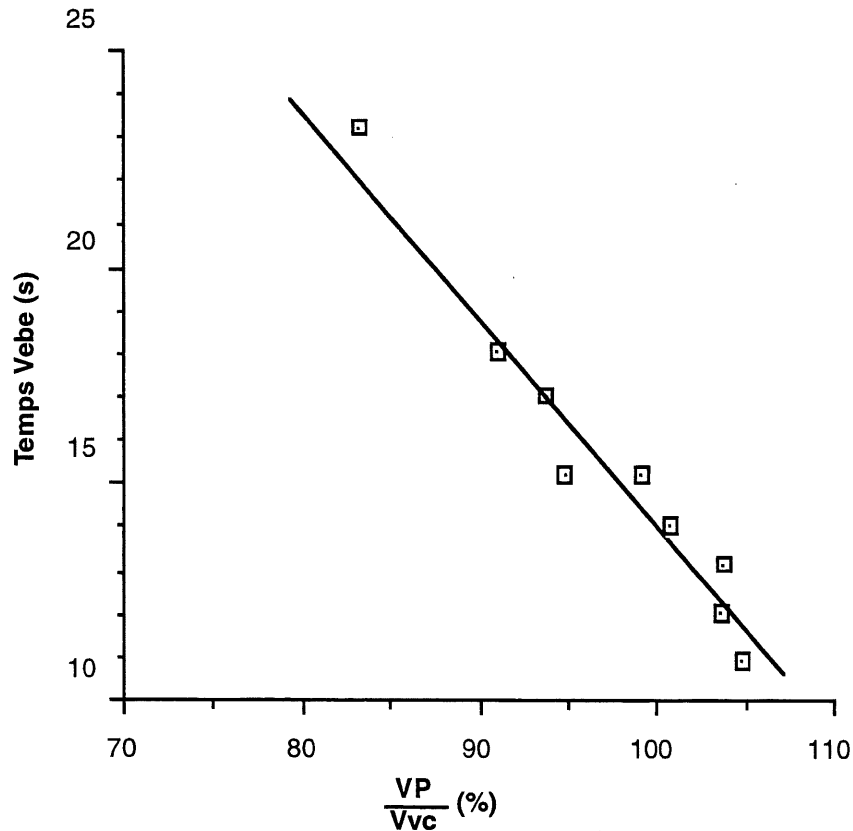


Figure 6.7: Relation entre le taux de remplissage des vides de compactage (VP/V_{vc}) et la maniabilité du BCR (temps Vebe).

Pour un volume de pâte donné, la forme et l'angularité des particules influencent très significativement la maniabilité du BCR (Figure 6.8). Le mélange LR-SLR, riche en particules plates, allongées et anguleuses, est le moins maniable (Vebe = 23 s) alors que le mélange P-SAC, constitué de particules cubiques et arrondies, est le plus maniable (Vebe = 11 s). À formulation constante, l'utilisation d'un mélange granulaire composé de particules cubiques ou arrondies permet donc d'améliorer très significativement la maniabilité du BCR.

En remplaçant la fraction grossière (> 5 mm) d'un mélange constitué de particules anguleuses (LGC-SLG) par des particules arrondies (LGR-SLG), on produit une

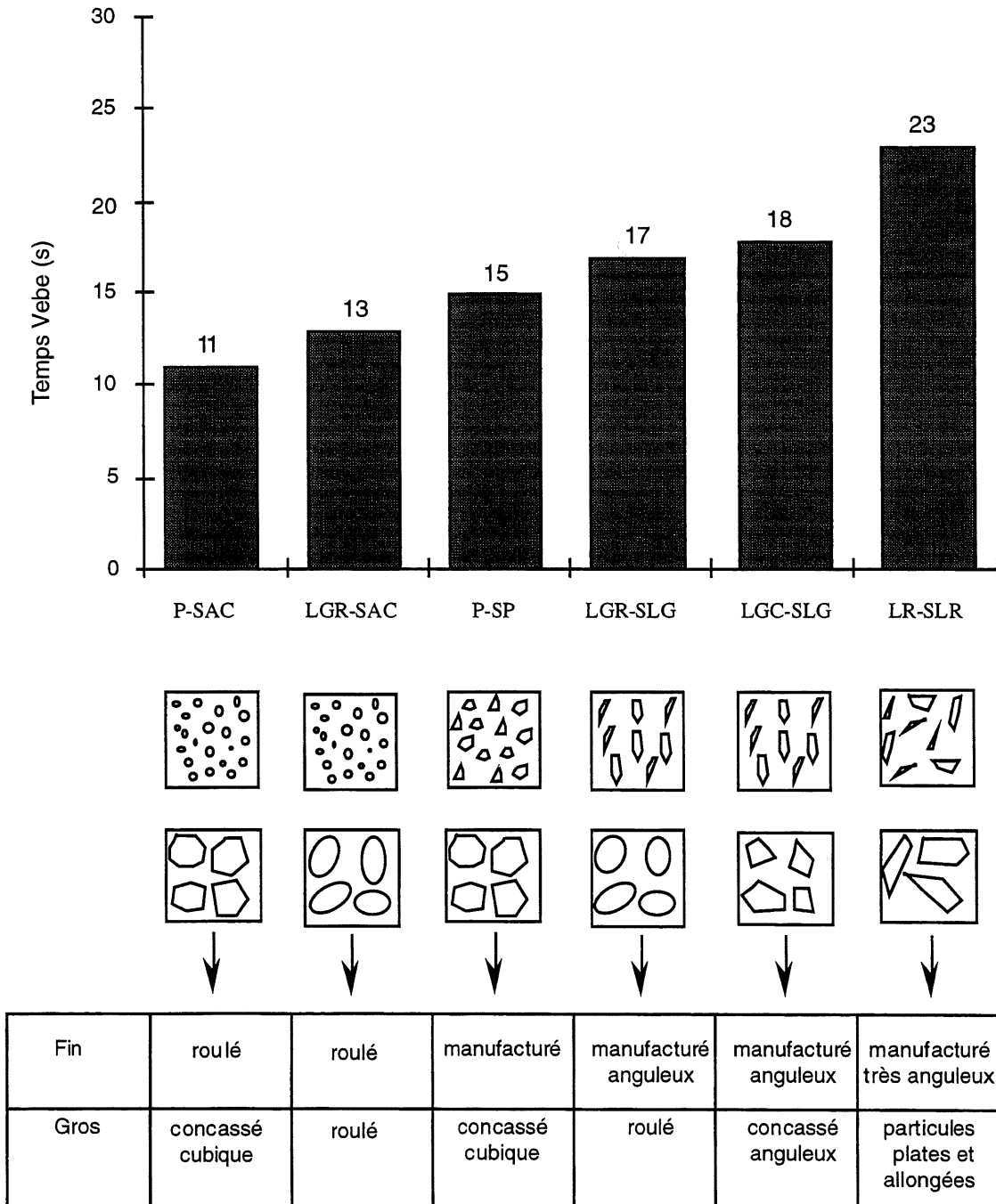


Figure 6.8: Influence de la forme et de la rugosité des granulats sur la maniabilité des BCR.

amélioration relativement faible de la maniabilité (le temps Vebe passe de 18 à 17 s). La comparaison des mélanges LGR-SAC et P-SAC, va dans le même sens (le temps Vebe passe de 13 s à 11 s en optimisant la forme de la fraction grossière).

C'est surtout en optimisant la forme de la fraction fine qu'on peut augmenter la maniabilité des BCR. En effet, en remplaçant la fraction fine d'un mélange constitué de particules anguleuses (LGR-SLG) par un sable naturel dont les particules sont arrondies (LGR-SAC), on constate que le temps Vebe passe alors de 17 s à 13 s.

À partir de la relation présentée à la Figure 6.7, il est possible d'estimer les volumes de pâte supplémentaires qui doivent être ajoutés au BCR pour compenser une perte de maniabilité résultant de l'utilisation de granulat dont la forme et la rugosité ne sont pas optimales (Figure 6.9).

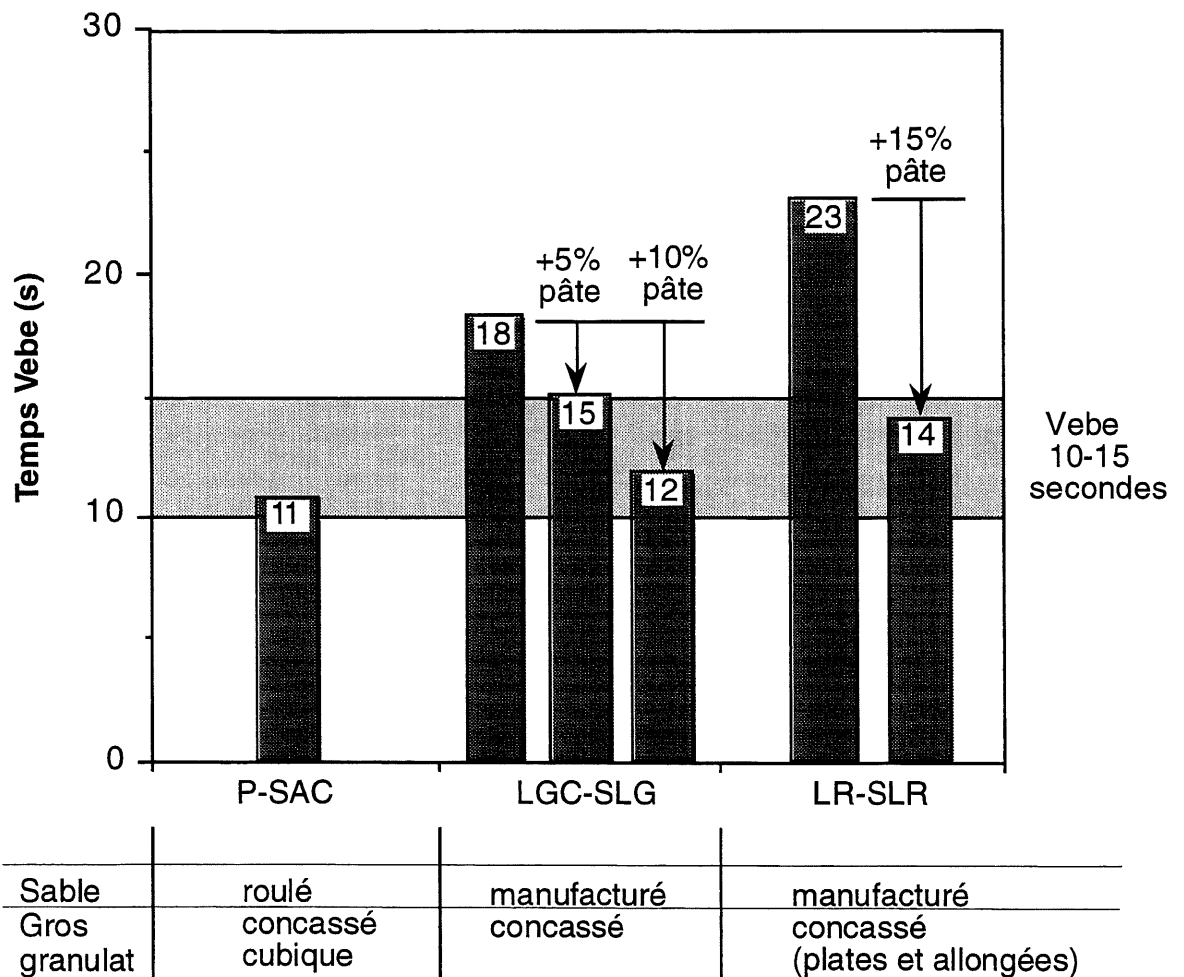


Figure 6.9: Influence du volume de pâte sur la maniabilité du BCR.

Trois BCR supplémentaires ont été produit avec les mélanges granulaires LGC-SLG et LR-SLR en visant, cette fois, des temps Vebe compris entre 10 et 15 s. On constate que pour compenser la perte de maniabilité résultant de l'utilisation d'un sable manufacturé (au lieu d'un sable naturel), il faut augmenter de 5% à 10% le volume de pâte dans le BCR. On remarque aussi qu'il faut ajouter jusqu'à 15% de pâte (en volume) pour compenser la perte de maniabilité résultant de l'utilisation de sable manufacturé et de gros granulats comportant une forte proportion de particules plates et allongées.

Maintenant qu'on a étudié l'impact de la forme et de la rugosité des particules d'un granulat sur le BCR à l'état frais, nous allons voir si ces deux variables affectent ou non les propriétés mécaniques et physiques du BCR durci. Dans le Tableau 6.9, on retrouve la résistance à la compression à 28 et 91 jours, la perméabilité à l'eau à 91 jours ainsi que le module d'élasticité statique à 91 jours pour les six BCR fabriqués.

Tableau 6.9: Caractéristiques du BCR durci.

BCR	f_c (MPa)		K_{eau} à 91d (m/s)	E_c à 91d (GPa)
	28d	91d		
P-SAC	19,4	25,0	36×10^{-13}	21
P-SP	19,6	21,9	38×10^{-13}	21
LGR-SAC	17,3	22,5	48×10^{-12}	14
LGR-SLG	17,5	22,5	56×10^{-12}	14
LGC-SLG	19,9	24,9	51×10^{-13}	30
LR-SLR	17,1	22,3	78×10^{-14}	33

6.2.2 Résistance à la compression

En examinant les résultats, on remarque que la résistance à la compression, à 28 et 91 jours, varie très peu d'un mélange à un autre. De 28 à 91 jours, la résistance à la compression augmente de 12 à 30 % selon les cas. Cette faible augmentation de résistance montre que le comportement des BCR étudiés ressemble plus au comportement d'un béton conventionnel qu'à celui d'un sol et s'explique par le volume de pâte élevé incorporé dans les BCR (mélanges riches en liants).

De plus, on sait que le BCR est un béton de masse dont la résistance à la compression dépend surtout de sa teneur en matières cimentaires et de son rapport E/L. Et parcequ'on a maintenu la formulation constante, on peut conclure que la variation de la forme et de la rugosité des granulats, dans le cas des BCR riches en liants, n'affecte pas significativement la résistance à la compression.

En principe, ce résultat nous amène à la conclusion suivante: l'optimisation de la forme et de la rugosité du mélange granulaire n'améliore pas la résistance à la compression, cependant on peut améliorer considérablement la maniabilité, ce qui est beaucoup plus important du point de vue économique. De même, il importe de se rappeler que dans le cas des barrages en BCR, les critères de dimensionnement de l'ouvrage sont principalement la résistance au cisaillement et la perméabilité à l'eau du BCR à l'interface entre les couches successives. Cela signifie qu'un BCR peu résistant à la compression ayant une bonne résistance au cisaillement et une faible perméabilité à l'eau à l'interface entre les couches successives est tout à fait convenable pour la construction des barrages et son utilisation peut être avantagée à celle d'un BCR, même très résistant, qui peut occasionner des infiltrations considérables ou un cisaillement à l'interface entre les couches (si le mortier de contact entre les couches n'est pas adéquat). Dans ce dernier cas, la stabilité de l'ouvrage peut être mise en jeu.

6.2.3 Perméabilité à l'eau

Contrairement à la résistance à la compression, la perméabilité à l'eau varie considérablement d'un mélange à un autre. Globalement, les résultats du Tableau 6.9 montrent que les BCR les plus imperméables sont ceux fabriqués à partir de mélanges granulaires dont les particules possèdent une texture rugueuse (voir aussi Figure 6.11).

Les résultats obtenus montrent clairement qu'en passant d'une texture lisse (LGR-SAC) à une texture rugueuse (LR-SLR), la perméabilité peut être réduite par plus de deux ordres de grandeur.

Une analyse plus détaillée des résultats montre que la rugosité du granulat fin influence relativement peu la perméabilité à l'eau. En effet, la perméabilité est demeurée pratiquement inchangée après avoir substitué un sable à texture lisse (P-SAC ou LGR-SAC) par un sable à texture rugueuse (P-SP ou LGR-SLG).

La perméabilité à l'eau des BCR est essentiellement fonction de la rugosité du gros granulat. Ainsi, les perméabilités les plus faibles (10^{-13} m/s et 10^{-14} m/s) ont été obtenues avec des gros granulats à texture rugueuse (P, LGC, LR). Inversement, le gros granulat à texture lisse (LGR) a toujours produit une perméabilité plus élevée (10^{-11} m/s) quelque soit le type du granulat fin..

Ces résultats importants montrent que la rugosité du granulat est une variable qui affecte considérablement la perméabilité à l'eau du BCR. Une telle conclusion peut être expliquée par l'effet de la rugosité des particules sur l'épaisseur de la zone de transition pâte-granulat. Cependant, l'affirmation de telle hypothèse nécessite l'analyse des résultats du module d'élasticité statique (directement lié à la zone de transition).

6.2.4 Module d'élasticité statique

Les résultats relatifs au module d'élasticité statique sont compatibles avec ceux relatifs à la perméabilité à l'eau, comme c'est illustré sur la Figure 6.11. En effet, l'utilisation d'un granulat riche en particules ayant, une texture rugueuse (LR-SLR) produit une augmentation du module d'élasticité statique qui résulte d'un meilleur transfert de charge entre la pâte et le granulat et probablement d'une densification de la zone de transition. Évidemment, une texture rugueuse implique une plus grande surface spécifique de la particule. Ce qui permet une augmentation de l'adhérence de la pâte au granulat et probablement une meilleure distribution du film d'eau autour du granulat lorsque le BCR est à l'état frais. Il en résulte, de cette hypothèse, que l'épaisseur du film d'eau autour du granulat diminue (puisque la surface spécifique est plus grande) et qu'il y aura probablement moins de cristaux de portlandite (CH) qui se formeront dans la zone de transition (voir Figure 6.10).

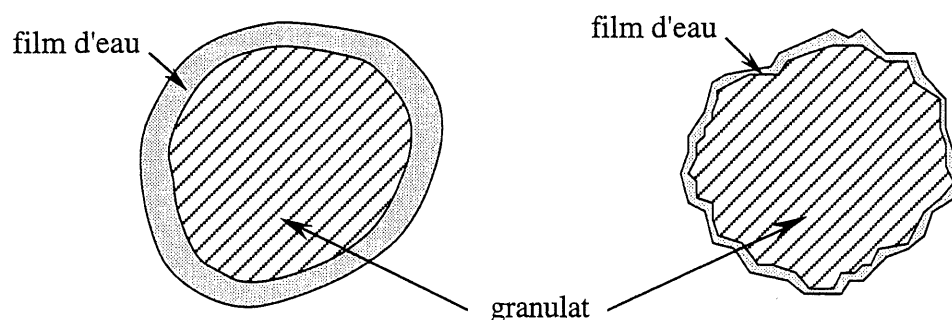


Figure 6.10: Effet de la rugosité du granulat sur l'épaisseur du film d'eau adsorbée.

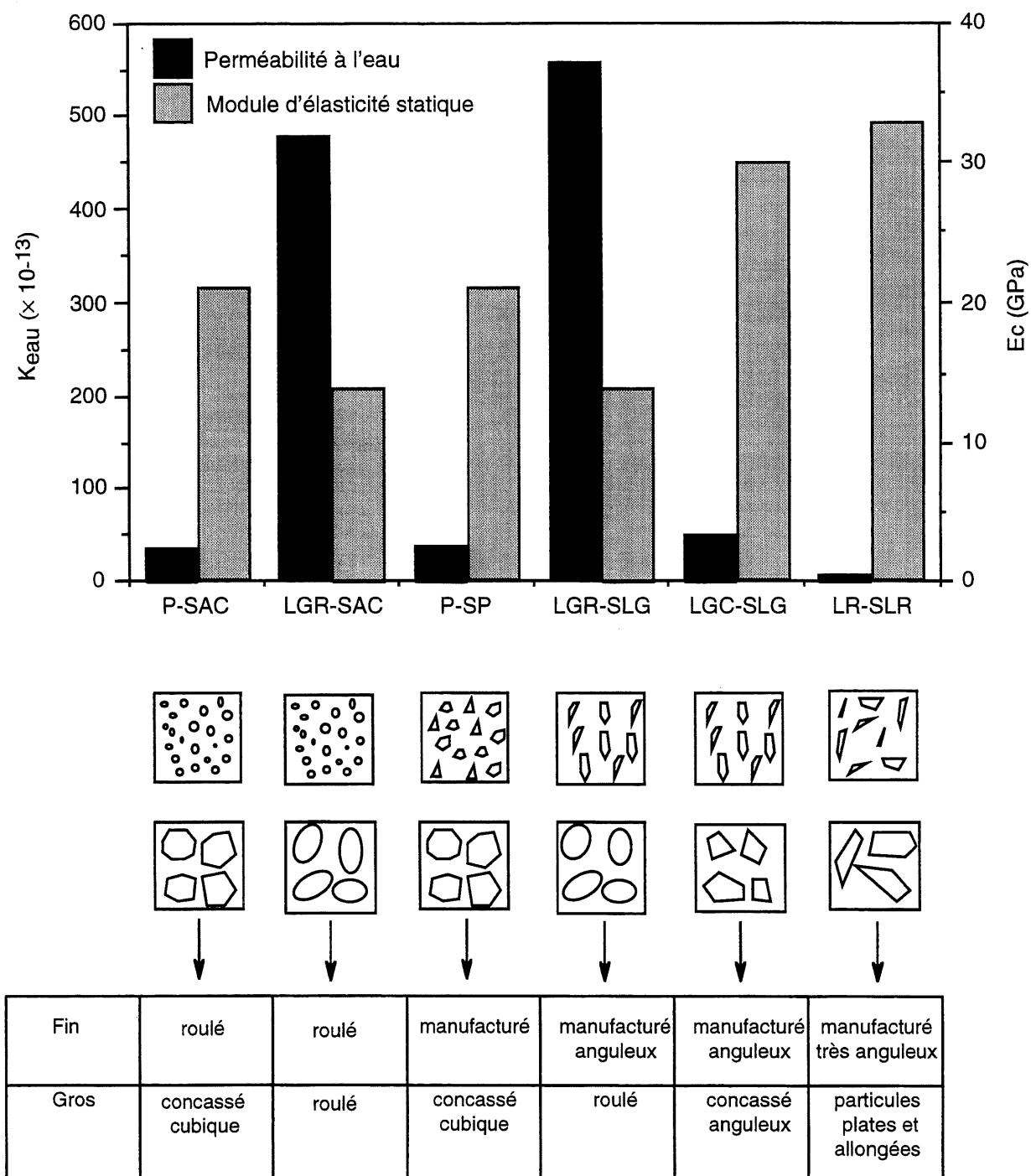


Figure 6.11: Influence de la forme et de la rugosité des granulats sur la perméabilité et le module élastique du BCR.

6.3 ANALYSE ÉCONOMIQUE

Sur la base des résultats de la Figure 6.9, on peut estimer l'augmentation du coût de production d'un mètre cube de BCR pour compenser la perte de maniabilité résultant de l'utilisation d'un mélange granulaire constitué d'un sable manufacturé ou de gros granulats riches en particules plates et allongées (Tableau 6.10). L'augmentation du coût de production résulte en fait de l'utilisation d'un plus grand volume de pâte par mètre cube de BCR.

On peut augmenter le volume de pâte en maintenant le rapport eau/liant constant ou en maintenant la teneur en eau constante. Lorsque le rapport E/L est constant, le volume d'eau, le volume de ciment et le volume des cendres volantes sont augmentés dans les mêmes proportions. Cette approche est la plus économique mais elle peut cependant conduire à l'utilisation d'une quantité d'eau par mètre cube relativement élevée. On doit éviter d'utiliser une trop grande quantité d'eau car le retrait du BCR est principalement fonction du dosage en eau du mélange.

Lorsque la teneur en eau est constante, seuls les volumes du ciment et de la cendre volante sont augmentés. Cette approche est nettement moins économique mais elle permet de maintenir et même d'augmenter le niveau de performance du BCR.

En pratique, le volume de pâte peut être augmenté en variant simultanément le rapport E/L et le dosage en eau du mélange. Les coûts supplémentaires correspondent alors approximativement à la moyenne des coûts calculés selon les deux approches extrêmes précédentes (Tableau 6.10).

Le Tableau 6.10 montre que lorsque le prix des matières cimentaires livrées au chantier est de 200\$ la tonne, une augmentation de 10% du volume de pâte peut entraîner des coûts de production supplémentaires de l'ordre de 3\$ à 10\$ du mètre cube de BCR. Lorsque le prix des matières cimentaires est faible (le chantier est proche du site de production du ciment), il est probablement plus économique d'augmenter légèrement le volume de pâte plutôt que d'utiliser un système de concassage permettant d'optimiser la forme et la rugosité des particules du mélange granulaire. Par contre, lorsque le prix des matières cimentaire est élevé (le chantier est situé en zone éloignée) il peut être nettement plus avantageux d'optimiser le système de concassage pour éviter de produire des granulats comportant une trop grande proportion de particules plates et allongées.

Tableau 6.10: Augmentation du coût de production d'un mètre cube de BCR en fonction du volume de pâte ajouté et du prix des matériaux cimentaires.

Volume de pâte ajouté (50% ciment-50% CV)	Coût supplémentaire pour 1 m ³ de BCR (\$)					
	Teneur en eau constante (120 kg/m ³)			Rapport eau/liant constant (E/L = 0,70)		
	Coût des matériaux cimentaires (\$/tonne)			Coût des matériaux cimentaires (\$/tonne)		
	100,00	200,00	400,00	100,00	200,00	400,00
+5%	2,50	5,00	7,50	0,75	1,50	3,00
+10%	5,00	10,00	15,00	1,50	3,00	6,00
+15%	7,50	15,00	30,00	2,25	4,50	9,00

Dans le cas où le chantier est proche d'une région métropolitaine (telle que Montréal), il est possible de profiter à la fois du bas prix des matières cimentaires et de l'abondance des carrières qui produisent des granulats dits "à forme optimisée". Les recherches que nous avons effectué auprès de certains carriers, affirment que parfois le prix au mètre cube d'un granulat "à forme optimisée" est strictement égal à celui d'un granulat ordinaire. Cet avantage permet d'éviter l'augmentation du volume de pâte pour apporter les corrections requises à la maniabilité sans pour autant déboursier un montant supplémentaire pour le granulat.

- Exemple d'un barrage en région éloignée des centres de production

Cet exemple est présenté afin de mettre en évidence les économies concrètes qu'on peut réaliser, lors de la construction d'un barrage, en utilisant un granulat ayant une bonne forme et rugosité.

Supposons que la construction du barrage a nécessité la mise en place d'un volume d'environ 40 000 m³ de BCR et que le coût des matières cimentaires livrées au chantier, en tenant compte de l'éloignement du chantier du site de production, est de l'ordre de 400 \$/tonne (Tableau 6.10).

À partir du Tableau 6.10, nous pouvons voir qu'une augmentation du volume de pâte de 15 % résultant de l'utilisation de granulat rugueux comportant une forte proportion de

particules plates et allongées, peut entraîner des coûts supplémentaires de:

- 9 \$ si le rapport eau/liant est constant ($E/L = 0,70$).
- 30 \$ si la teneur en eau est constante (120 kg/m^3).

Ainsi, on peut évaluer le coût supplémentaire pour le volume total du barrage que peut occasionner l'utilisation d'un sable manufacturé et d'un granulat riche en particules plates et allongées, soit:

- $9 \times 40\,000 = 360\,000 \$$ si le rapport eau/liant est constant.
- $30 \times 40\,000 = 1\,200\,000 \$$ si la teneur en eau est constante.

Or en pratique, nous savons qu'il est plus avantageux de faire varier simultanément le rapport E/L et le dosage en eau du BCR. Par conséquent, le coût supplémentaire du barrage est compris entre 360 000 \$ et 1 200 000 \$. Supposons, d'une façon réaliste, qu'il égale 800 000 \$. Sachant que cette somme peut défrayer la facture d'un concasseur à impact (environ 600 000 \$), il est donc beaucoup plus avantageux d'investir dans un système de concassage afin d'améliorer la forme des particules. De tels systèmes de concassage présentent l'avantage d'être réutilisables dans des applications ultérieures.

CONCLUSION

Le béton compacté au rouleau est un matériau qui, de par sa mise en œuvre, ne ressemble à aucun autre matériau que l'on est habitué de retrouver sur les chantiers de génie civil: à l'état frais, il est plus déformable qu'un sol, un sol bitumineux ou un béton sec, il est plus raide qu'un béton ordinaire (capable de supporter le poids du rouleau vibreur lors de la mise en place).

Certes, la plasticité du béton compacté au rouleau est fonction de la quantité de liant (ou de fines) qu'on y incorpore, mais aussi, ce que l'on oublie trop souvent, de la forme et de la rugosité des particules de granulat. En effet, nous avons montré que, d'une part, pour une granulométrie donnée, le temps Vebe pouvait varier du simple au double selon que le BCR était fabriqué avec des granulats ayant des particules cubiques ou arrondies ou bien plates et allongées et que d'autre part la maniabilité du béton compacté au rouleau est une fonction linéaire du taux de remplissage des vides du granulat (VP/V_v qui dépend directement de la forme et de la rugosité des particules).

La corrélation entre la maniabilité du BCR et le taux de remplissage des vides du granulat peut apporter, entre autres, deux éléments d'information très importants sur le volume de pâte qu'on doit incorporer à un mélange granulaire pour atteindre le niveau de performance visé et sur l'intérêt d'investir dans un procédé de concassage plus sophistiqué afin d'obtenir des granulats ayant une forme cubique ou arrondie. Évidemment, c'est le coût des produits cimentaires sur le chantier qui détermine l'intérêt d'investir dans le concassage des granulats. Par exemple, si le prix de revient des matériaux cimentaires sur le chantier est de 300 \$/tonne, l'utilisation d'un granulat cubique ou arrondi peut se traduire par des économies de matériaux cimentaires de l'ordre de 8 \$ à 10 \$/m³ par rapport au cas où l'on aurait utilisé des granulats riches en particules plates et allongées. Aussi, nous avons pu démontrer que la maniabilité du BCR est surtout influencée par la forme et la rugosité du granulat fin. Par conséquent, l'utilisation d'un mélange granulaire composé d'un sable naturel et d'un gros granulat, dont la forme des particules est cubique, facilite la fabrication de BCR de très bonne maniabilité.

Les résultats sur le BCR durci ont montré qu'à formulation constante, la perméabilité du BCR (propriété importante pour les barrages) dépend essentiellement de la rugosité des particules du gros granulat. Les BCR qui ont été fabriqués à partir de mélanges granulaires, dont la texture des particules du gros granulat est rugueuse, sont les moins perméables. Les résultats relatifs au module d'élasticité statique ont confirmé les résultats de la perméabilité et ont, de plus, démontré que selon le type de rugosité des particules du gros granulat on peut soit obtenir une bonne ou une mauvaise adhérence entre la pâte et le granulat.

Les conclusions auxquelles nous sommes arrivés, lors de cette étude, nous permettent donc de dire que la forme et la rugosité du granulat sont des variables aussi importantes que la granulométrie. Elles peuvent avoir des répercussions très importantes sur les coûts de production des BCR. Il est donc nécessaire de les prendre en considération lors de la formulation du BCR en mesurant le volume de vides de compactage. Le béton compacté au rouleau pour barrages doit être à la fois maniable, pour une bonne mise en place, et peu perméable, pour limiter les infiltrations. Pour produire un BCR le plus économique qui satisfait à ces exigences, il est fortement recommandé d'utiliser *un mélange granulaire composé d'un sable naturel et d'un gros granulat dont les particules ont une forme cubique et une texture rugueuse.*

Cette étude montre qu'en fonction de la forme et de la rugosité des particules, le volume de pâte qu'il faut incorporer dans le BCR, pour atteindre une bonne maniabilité, peut varier considérablement. Cette variation peut dans certains cas causer des problèmes de retrait. Il serait donc très intéressant d'étudier, dans l'avenir, l'influence de la forme et de la rugosité des particules sur le retrait du BCR pour barrages. Aussi, il serait très intéressant de voir si l'énergie de compactage peut changer la granulométrie du granulat (fragmentation des particules énergiquement sollicitées), et par conséquent le volume des vides (V_{vc}). Les prédictions de la maniabilité que nous permette la Figure 6.7 peuvent être faussées (V_{vc} différent de ce que nous avons mesuré) si nous ne tenons pas compte d'éventuel effet de l'énergie de compactage sur l'indice des vides.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] AÏTCIN, P.-C., JOLICŒUR, G., MERCIER, M. (1983) *Technologie des granulats*, 1ère édition, les éditions Le Griffon d'argile p.372.
- [2] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1988) *Roller-Compacted Mass Concrete*, Report 207.5R.
- [3] ARQUIÉ, G., TOURENQ, C. (1990) *Granulats*, Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées p.717.
- [4] AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (1994) *Roller-Compacted Concrete*, ASCE Press p.100.
- [5] BARKSDALE, R.D. (1991) *The Aggregate Handbook*, National Stone Association Washington (D.C.).
- [6] BARON, J., SAUTEREY, R. (1982) *Le béton hydraulique: connaissance et pratique*, Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées p.560.
- [7] BARTOS, P. (1992) *Fresh Concrete: Properties and Tests*, Elsevier p.292.
- [8] BUREAU DE NORMALISATION DU QUÉBEC (1986) *Norme - Sols: Détermination des masses volumiques minimale et maximale des sols pulvérulents -Essai à la table vibrante-*, Bibliothèque nationale du Québec p.15.
- [9] CANNON, R.W. (1972) *Concrete Dam construction using earth compaction methods in Economical construction of concrete dams*, ASCE, New York.
- [10] CAQUOT, A. (1937) *Le rôle des matériaux dans le béton*, Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils de France p.562-582.
- [11] CASIAS, T.J., GOLDSMITH, V.D., BENAVIDEZ, A.A. (1988) *Soil Laboratory Compaction Methods Applied to RCC*, Roller-Compacted Concrete II, ASCE New York p.107-122.

- [12] DUNSTAN, M.R.H. (1981) *Rolled Concrete for Dams - A Laboratory Study of the properties of High-Fly ash Content Concrete*, Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), Technical Note 105, London.
- [13] DUNSTAN, M.R.H. (1985) *A Method of Design for the Mix Proportions of Roller-Compacted Concrete To Be Used in Dams*, Transactions, 15th International Congress on Large Dams (Lausanne), International Commission on Large Dams, Paris, Vol.2, p.713-738.
- [14] DUNSTAN, M.R.H. (1994) *Future Trends on Roller-Compacted Concrete Dam Construction*, Concrete Technology: Past, Present, and Future, ACI SP 144, p.307-724.
- [15] FORBES, B.A. (1988) *The Development and Testing of Roller-Compacted Concrete for Dams in Australia*, Transactions, 16th International Congress on Large Dams (San Francisco), International Commission on Large Dams, Paris, Vol.3, p.89-117.
- [16] GAGNÉ, R., AÏTCIN, P.C., JEMMALI, N., ROBITAILLE, F. (1995) *Influence de la forme et de la texture des particules d'un granulat sur les coûts de fabrication d'un béton compacté au rouleau*, Rapport de recherche, Groupe Béton de l'Université de Sherbrooke p.18.
- [17] GARNIER et ROBERT (1979) *Détermination de l'angularité des gravillons et des sables*, Bull. Liaison LPC, No.14, p.61.
- [18] HANSEN, K.D., REINHARDT, W.G. (1991) *Roller-Compacted Concrete Dams*, McGraw-Hill Inc., New York p.298.
- [19] HIROSE, T. and YANAGIDA, T. (1981) *Some Experiences Gained in Construction of Shimajigawa and Okawa Dams*, Proceedings, CIRIA International Conference on Rolled Concrete for Dams, Construction Industry Research and Information Association, London.
- [20] KAPLAN, M.F. (1958) *The effects of the properties of coarse aggregates on the workability of concrete*, Magazine Concrete Research, 10, No.29, p.63-74.
- [21] KOSMATKA, S.H., PANARESE, W.C., ALLEN, G.E., CUMMING, S. (1991) *Dosage et contrôle des mélanges de béton*, CPCA, 5ème édition métrique canadienne, p.213.
- [22] LEES, G. (1964) *The measurement of particle shape and its influence in engineering materials*, Journal of British Granite and Whinstone Federation 4, p.1-22.

- [23] MATHER, B. (1975) *New concern over alkali-aggregate reaction*, symposium on alkali-aggregate reactions -Preventive measures-, Reykjavik.
- [24] MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. (1993) *Concrete: Structure, Properties, and Materials*, 2nd edition, Prentice-Hall p.548.
- [25] NEVILLE, A.M. (1981) *Properties of Concrete*, 3rd edition, Pitman London p.779.
- [26] OZOL, M.A. (1978) *Shape, surface texture, surface area, and coatings*, ASTM Special Technical Publication. No.169B, p.584-628.
- [27] PERRATON, D., AÏTCIN, P.-C., et VÉZINA, D. (1988) *Permeability of Silica Fume Concrete*, American Concrete Institute Special Publication SP-108: Permeability of Concrete, p.63-84.
- [28] RAMSAY, D.M. (1965) *Factors Influencing Aggregate Impact Value in Rock Aggregate*, Quarry Managers Journal, London 49, p.129-34.
- [29] REEVES, G.N. and YATES, L.B.Jr. (1985) *Simplified Design and Construction Control for Roller-Compacted Concrete*, Roller-Compacted Concrete, American Society of Civil Engineers (ASCE), New York p.48-61.
- [30] SAUCIER, K.L. (1994) *Roller-Compacted Concrete (RCC)*, Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, ASTM, STP 169C, p.567-576.
- [31] SCHRADER, E.K. (1982) *The first concrete gravity dam designed and built for roller-compacted construction methods*, Construction International, American Concrete Institute, Chicago.
- [32] SCHRADER, E.K. (1994) *Fracture and Materials Properties of Roller-Compacted Concrete*, Concrete Technology, CANMET, p.325-347.
- [33] SHERGOLD, F.A., GREYSMITH, M.G. (1947) *Factors governing the grading and shape of crushed rocks - a survey of the literature*, Quarry Managers journal, London 30, p.703-12.
- [34] SHERGOLD, F.A. (1953) *The percentage voids in compacted gravel as a measure of its angularity*, Magazine Concrete Research, 5, No.13, p.3-10.

- [35] SMITH, M.R., COLLIS, L. (1993) *Aggregates: Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes*, 2nd edition, The geological Society London p.339.
- [36] TAYABJI, S.D., and OKAMOTO, A.S. (1987) *Bonding of Successive Layers of Roller-Compacted Concrete*, Construction Technology Laboratories, Skokie (Ill.).
- [37] WADELL, H. (1933) *Sphericity and roundness of rock particles*, Journal of Geology, 41, p.310-31.
- [38] WRIGHT, P.J.F. (1955) *A method of measuring the surface texture of aggregate*, Magazine Concrete Research, 5, No.2, p.151-60.
- [39] YAMAUCHI, T., HARADA, J., OKADA, T., and SHIMADA, S. (1985) *Construction of Tamagawa Dam by the RCD Method*, Transactions, 15th International Congress on Large Dams (Lausanne), International Commission on Large Dams, Paris, Vol.2, p.39-114.
- [40] ZINGG, T. (1935) *Beitrag zur Schotteranalyse*, Schweiz-mineral.Petrog.Mitt., 15, p.39-140.